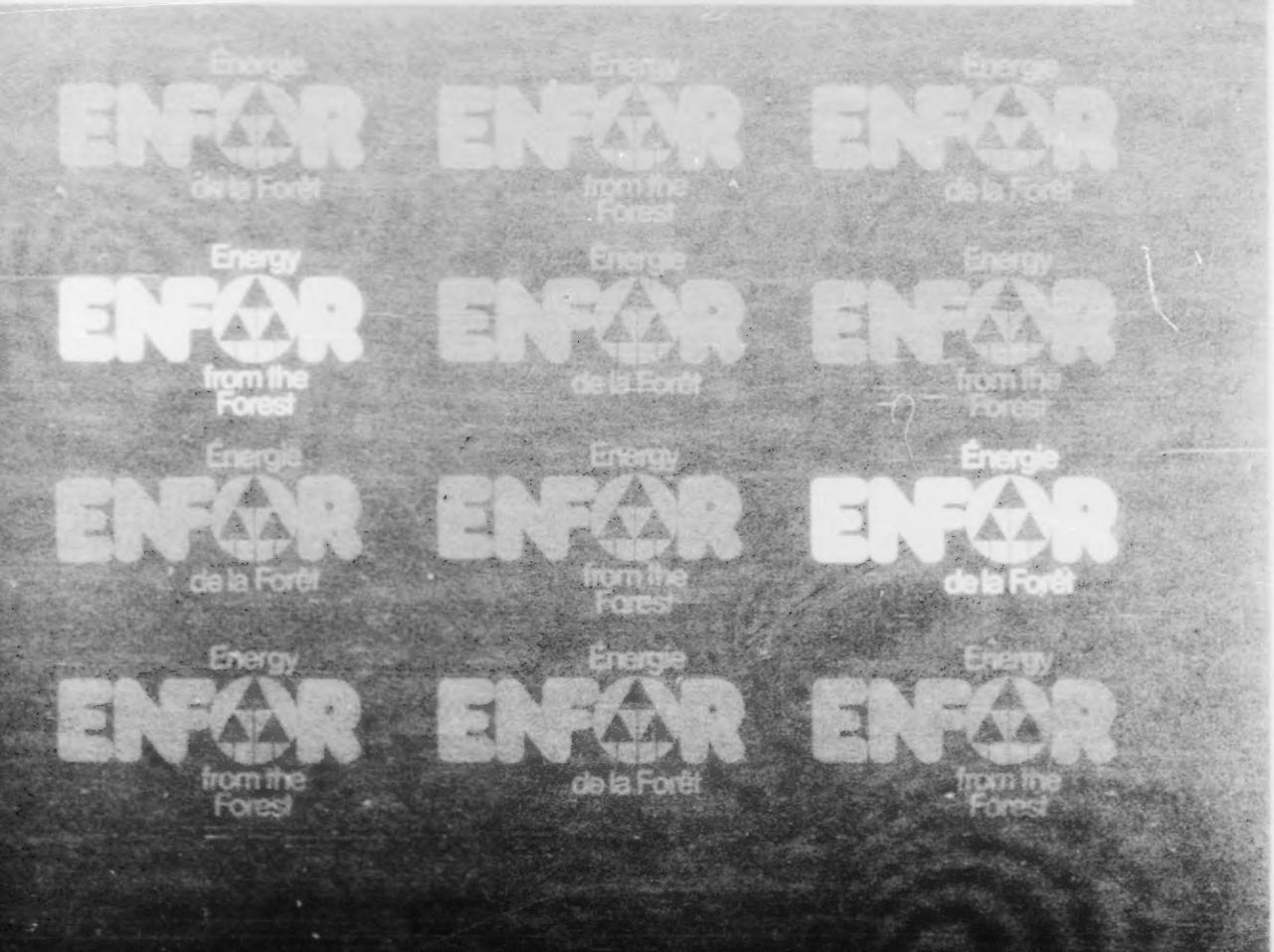
FERIC

FOREST ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE OF CANADA
INSTITUT CANADIEN DE RECHERCHES EN GÉNIE FORESTIER

The Composition of Full-Tree Logging Residues and Testing of the Prototype Logging Residue Processor (LRP)

Wayne Novak



38-00254/

The Composition of Full-Tree Logging Residues and Testing of the Prototype Logging Residue Processor (LRP)

Wayne Novak

Special Report N^{0} SR-38

October 1986

© Copyright 1986, Forest Engineering Research Institute of Canada

ISSN 0381-7733

DSS Contract N° 1SS85-00113
DSS File 55SS.01K02-5-0150

Contractor:

Forest Engineering Research Institute of Canada
143 Place Frontenac
Pointe Claire, Québec
H9R 4Z7
Tel. (514) 694-1140

Scientific Authority:

Mr. Brad Sutherland
Great Lakes Forest Research Centre, CFS
P.O. Box 490
Sault Ste-Marie, Ontario
P6A 5M7
Tel. (705) 949-9461

Science Contracting Officer:

Mr. R. N. Finlayson
Science and Professional Services, DSS
12C1 Place du Portage
11 Laurier Street
Hull, Québec
K1A 0S5
Tel. (819) 997-7349

This report is available from:

Forest Engineering Research
Institute of Canada
143 Place Frontenac
Pointe Claire, Québec
H9R 4Z7

ENFOR Secretariat
Canadian Forestry Service
Ottawa, Ontario
K1A 0E7

Ce rapport est aussi disponible en français.

PREFACE

This report was prepared under the auspices of the Canadian Forest Service's Energy from the Forest (ENFOR) program. The ENFOR program was initiated in the late 1970's to promote the development and utilization of renewable sources of energy to reduce the nation's reliance on fossil fuels.

In 1985, a joint ENFOR/FERIC report was published describing the development and trial of two machines designed to gather and process biomass produced from logging operations. The original machine, called the RECUFOR, was designed to comminute residues in the stump area. The second prototype, called the Logging Residue Processor (LRP), and designed to process residues concentrated at roadside, underwent testing in the autumn of 1984. A subsequent ENFOR contract was awarded to FERIC, in late 1985, to modify the LRP to increase its productive capacity. This report describes the results of testing of the modified LRP.

During this same period, the Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec (MER) contracted FERIC to investigate the composition (density, moisture content, piece-size, etc...) of full-tree logging residues at roadside and assess the economics of utilizing the LRP as an alternative to slash burning. The results of this study were also incorporated in the report.

The reader is cautioned that the test results presented are specific to the test sites, logging systems and operations studied and thus, should only be applied with discretion.

TABLE OF CONTENTS

	Page
PREFACE	i
SUMMARY	iii
INTRODUCTION	1
LOGGING RESIDUE PROCESSOR	3
Machine Description	3
Study Locations	4
STUDY RESULTS	
I. **RESIDUE COMPOSITION**	6
. Residue Volume and Location from Roadside	6
. Bulk Density	8
. Solid Wood Content and Piece-Size Distribution	10
. Moisture Content	11
II. **LOGGING RESIDUE PROCESSOR**	13
. Prototype Test Results - November 1984	13
. Machine Modifications	13
. Modified LRP Test Results - December 1985	15
. Test Conditions	15
. Processing Cycle	16
. Loading Cycle	16
. Blowing Distance of Discharged Residues	18
. Expected Operating Costs	20
CONCLUSIONS	21
REFERENCES	23
APPENDIX A - CONVERSION TABLE	24

SUMMARY

The greater use and development of renewable sources of energy was the mandate of the Canadian Government's Energy from the Forest (ENFOR) program. In relation to the forest products industry, this meant the development of appropriate machines and systems to recover and process forest biomass for energy.

Changes in the world energy context and new trends in domestic harvesting methods switched emphasis from the recovery of biomass left on cutovers to the use of residues produced at roadside from full-tree delimbing operations. In 1984, the Logging Residue Processor (LRP) was developed by the Forest Engineering Research Institute of Canada (FERIC), under the ENFOR program, to gather and process full-tree logging residues. Initial test results concluded that a number of modifications were required to bring the LRP to a commercial level of production. To this end, in late 1985, FERIC was contracted to implement specific machine modifications and carry out a second performance trial.

During this same period, the Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec (MER) was experimenting with slash burning techniques to reclaim the productive forest area lying under the piles of full-tree logging residues. However, the fire hazards and operational constraints associated with open-air burning increased the MER's interest in finding alternative methods to process such materials. As such, the MER contracted FERIC to measure the physical characteristics of full-tree logging residues and assess the economics of using the LRP as an alternative to slash burning.

The machine trial and field activities were performed in November-December 1985. Residue composition measurements (density, moisture content, piece-size) were done on a small sample of spruce and jack pine residues. The sites sampled were harvested during the summer of 1984 using manual and mechanical fallers. Extraction was done with a combination of grapple and cable skidders. Mechanical delimbing at roadside was performed with either Tanguay, Harricana or Denis machines.

The residues spread distance from the roadside varied from 16 to 24 m, and thus would require an increase in the LRP's boom reach (18.3 m) to gather all of the materials sampled. Short of changing delimbing equipment and operating methods, optional boom lengths are required to meet varying user requirements.

The volume of residues in the roadside piles was approximately 3500 m^3/ha and their bulk density was just over 200 kg/m^3, giving about 700 green tonnes/ha.

The piece-size distribution was similar for both species. Approximately 80% of all the woody material was comprised of pieces no larger than 2 cm in diameter, but they represented only 15% of the total fibre content. The largest stem diameter was 12 cm and 16 cm for the spruce and jack pine samples, respectively.

Residue samples selected for moisture analysis were separated into a foliage and woody material category. Each sample was also identified in relation to its location (depth) within the residue pile. The moisture content of the foliage was twice that of the woody material. As one would expect, moisture content also increased in relation to their depth in the pile. The average moisture content (oven-dry basis) for the woody material and foliage at the 25-cm depth was 100% and 225%, respectively. At the 100-cm depth, the average rose to 150% (woody) and 275% (foliage). All moisture samples were taken during the month of November. As such, much of the residues were already in a frozen and/or semi-frozen state. No comparative samples are available for summer.

The test results of the modified LRP demonstrated a potential productivity of 26 green tonnes per productive machine hour (PMH) or 4 tonnes better than the 1st prototype. However, low loader productivity limited the machine's actual processing rate to 12 green tonnes/PMH. Operator inexperience, slow cycle times and small grapple loads all contributed to the loader's inferior productivity. A loading rate of 26 tonnes/PMH could be realized by increasing the average load per grapple to 500 kg from the measured 243 kg. The installation of a infeed chute to facilitate the positioning and entry of residues into the shearing rotor would further enhance loader productivity by about four tonnes/PMH.

The LRP's blower discharged the fragmented residues up to 26 m from the discharge pipe. However, should the further use of such biomass (i.e., for energy) not be economical, the discharge pipe would require modifications and an oscillation mechanism to disperse the debris into the cutover area. Moreover, to facilitate subsequent scarification and planting operations, the maximum depth of the blown debris should be limited to 10 cm.

An expected operating cost of $5.28/green tonne (loaded in the transport trailer) was considered to be typical of the LRP's potential working at roadside. On the surface, the cost per tonne appears to be acceptable. However, the costs do not look as favourable when determining the expenditures ($3696/ha) associated with recovering a hectare of productive forest area (average residue loading equals 700 tonnes/ha). Clearly, the use of the LRP to reclaim such areas must be carried out in conjunction with wood energy operations.

Moreover, the economics of utilizing forest biomass for energy does not look as promising in today's energy climate of reducing oil prices. Thus, future efforts should be directed towards improving existing equipment and/or methods (i.e., raking, burning) to treat full-tree residue piles at roadside.

INTRODUCTION

In the late 1970's, the Canadian Forestry Service implemented the ENFOR (Energy from the Forest) program. At that time, several conditions favoured the recovery of logging residues for energy. First, in view of the steady increase in world oil prices and given the nation's limited supplies of fossil fuels; logging residues became economically more attractive and were clearly seen as a potential substitute for conventional sources of energy. Secondly, inventories carried out to assess the amount of residues left after logging showed that such materials constituted a significant potential source of renewable energy. Thus, the ENFOR program was established to encourage the use of renewable sources of energy and to develop the necessary technology to recover forest biomass.

During ENFOR's implementation, about 80% of the total Canadian wood harvest was done by means of the shortwood and tree-length systems. Since both these systems leave large quantities of residues on the logging site, priority was given to the development of technology to recuperate residues on the cutovers.

In 1979, FERIC was mandated, under the ENFOR program, to undertake a research and development program to recover and process forest biomass for energy. More specifically, FERIC was to develop an experimental machine to; recover logging residues from logging sites, increase the materials bulk density, and forward the residues to roadside for transport. FERIC subsequently undertook to design and build an experimental machine. This phase, as well as subsequent phases, were contracted to the firm "Logging Development Corporation" in Montreal. A machine design was completed by 1981 and the prototype, called the RECUFOR, was field tested during the summer of 1982.

In the early 1980's, many changes were occurring in the overall energy context and new trends in harvesting methods switched interest from the recovery of biomass left on cutovers to the use of biomass produced at roadside from full-tree delimbing operations, thus altering the orientation of forest biomass recovery methods and equipment. In 1984, the RECUFOR was redesigned to gather and comminute logging residues located at the roadside. The new prototype, called the Logging Residue Processor (LRP), was tested during the autumn of 1984. In late 1985, the test results were published in a joint ENFOR/FERIC report[1] entitled "The Development and Trial of Two Prototype Machines (RECUFOR and LRP) for Forest Biomass Recovery". The report concluded that a number of modifications were required to improve the LRP's productive capacity. To this end, a subsequent ENFOR contract was awarded to FERIC to implement specific machine modifications and perform a second production trial. This report describes the results of testing of the modified LRP.

Over the past few years, the Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec (MER) has become increasingly concerned with the quantity of residues being produced at roadside following full-tree logging operations. Such residue concentrations are slow to degrade, thus reducing the productive land base available for reforestation. Efforts to reclaim such areas have included experimental slash burning techniques. However, the fire hazards and operational constraints associated with open-air burning increased interest in the development of machines, such as the LRP, to process such residues. The MER awarded FERIC a contract to measure the composition of full-tree residues and to assess the feasibility of using the LRP as an alternative to slash burning. The results of this study were also incorporated in the report.

LOGGING RESIDUE PROCESSOR (LRP)

Machine Description

The Logging Residue Processor (LRP) is a self-propelled, two-stage reduction unit designed to process residues generated at roadside and/or at a central location into a form more suited for transportation. As an alternative to burning, the LRP can also be used to comminute and disperse roadside slash, thereby increasing the area of productive forest land available for subsequent site preparation and regeneration.

Equipped with a sliding boom and grapple, the LRP grasps residues and deposits them into a shearing rotor. The sheared residues are then fed into a conventional hammer mill and blown through a discharge pipe into a container, or are simply dispersed. As illustrated in Figure 1, the dimensions and main components of the LRP include:

1. Frame - Several parts of the RECUFOR were reused in the construction of the LRP, thereby reducing building and assembly costs. The RECUFOR's Clark 880 conventional skidder frame was converted to carry the LRP components. Overall machine length, width and height are 12.25 m, 4.11 m and 5.08 m, respectively. Total weight is 36 000 kg.

2. Engine Power - 240 kW (rated SAE flywheel).

3. Shearing Rotor - The RECUFOR's shearing rotor was also adapted to the LRP. Mounted horizontally, the shearing rotor contains seven knives (see Figure 9) designed to sever raw residues into smaller, more homogeneous pieces prior to entering the hammer mill. The vertical feeding principle allows for processing of randomly-oriented residues.

4. Hammer Mill - A Jeffrey 45 WB hammer mill is mounted on the LRP and is the final reduction stage. The homogeneity of the material produced should ease its subsequent handling, drying and combustion. Moreover, a hammer mill resists damage from contaminants better than a chipper.

5. Horizontal Blower - A horizontal blower, rated at 37 kW, delivers residues from the hammer mill to a discharge pipe. The discharge pipe is designed with a 45^0 elbow to facilitate truck/container loading.

6. Sliding Boom Loader - The LRP is equipped with a 13.6-m sliding boom and grapple which provide an effective operating range of 18.3 m and a grapple capacity of approximately 500 kg. The boom and cab are mounted on a turntable.

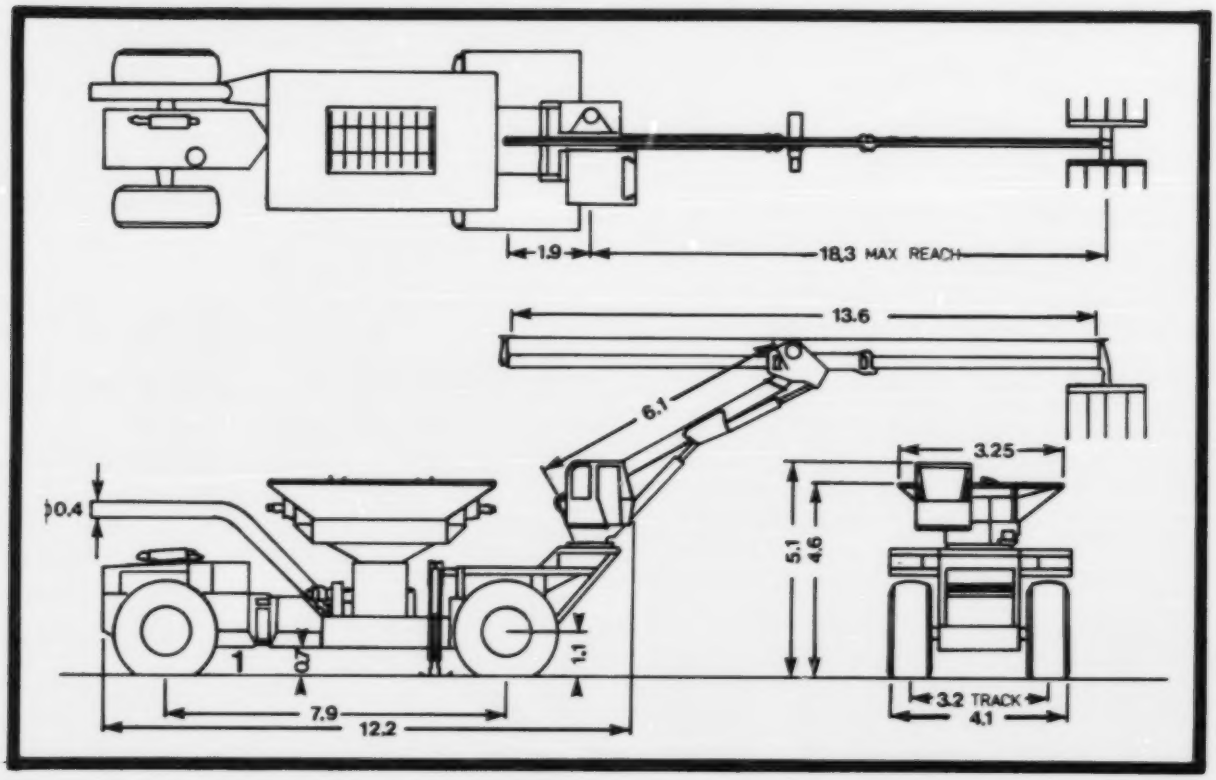


Figure 1. The Logging Residue Processor (Dimensions in meters).

A description of the LRP's modifications and subsequent production results are presented following the residue composition section (see page 13).

Study Locations

FERIC field activities were conducted during the month of November 1985, and were confined to measuring the composition (bulk density, moisture content, piece-size, volume) of residues produced at roadside following full-tree logging operations.

The study was limited to two locations. The first, on the limits of the Scieries St. Michel Inc. (St. Michel des Saints, Québec), provided concentrations of spruce residues only. The second, on CIP Inc.'s limits (Camp Pensive, Maniwaki Division, Québec), provided samples of both jack pine and spruce residues. Table 1 summarizes the stand volumes and average tree size for each location.

Table 1. Average Stand Conditions*

Location	Species Distribution % of stems	Volume/Tree m^3	Merchantable Stand Volume m^3/ha	Logged Volume m^3/ha
Site 1 (St. Michel)	Spruce, 70%	.17	65	65
	White Birch, Trembling Aspen, 30%	.47	70	0
Site 2 (Pensive)	Jack pine, 100%	.163	140	140
Site 2 (Pensive)	Spruce, 100%	.08	77	77

* All figures were obtained from company records.

As indicated above, the stand composition at Site 1 contained a mixture of spruce and hardwood species, however only the spruce was harvested. At Site 2, the areas sampled contained pure stands of jack pine and spruce. In terms of the volume logged per hectare, the spruce areas were similar at 65 and 77 m^3/ha. However, the jack pine stand contained 140 m^3/ha, roughly twice that of the spruce areas.

All wood was harvested and delimbed during the summer of 1984. Tree felling was performed manually at Site 1 followed by cable skidding. At Site 2, trees were felled and bunched mechanically and extracted to roadside with either cable or grapple skidders.

Mechanical delimbing at Site 1 (see Figure 2) was performed with Tanguay delimbers, whereas Harricana and Denis machines were used at Site 2. All the delimbers operated on the road surface, thus depositing residues close to the roadside. In addition, the delimbed stems were placed on top of the slash pile facilitating subsequent scaling and truck loading, while providing some degree of residue compaction.

Figure 2. Delimbers such as the Tanguay (left) and Harricana (right) were used at the St. Michel and Pensive locations, respectively. Operating on the road surface maintains residue concentrations close to the roadside, thus facilitating further treatments.

I. RESIDUE COMPOSITION

The study objectives were not concerned with assessing the quantity of slash generated per hectare logged. A study done by the MER[2] concluded that, based on 32 374 hectares inventoried, approximately 5% of the productive forest area is lying under residue piles produced from full-tree logging operations using mechanical delimbers at roadside.

Instead, the study was specific to the residue piles themselves, detailing pile configuration, volume per unit area (hectare) of pile and bulk density. As such, the study design permitted the determination of residue weight (tonnes) per unit area, allowing an estimation of LRP productivity in land reclamation.

Residue Volume

A total of 3.0 kilometers of residue piles at roadside were measured, comprised of 0.75 and 2.25 kilometers of jack pine and spruce, respectively. A sampling grid was used to measure the slash height from ground level at various points along the residues total length and width. At every 15 m along the pile face, a perpendicular line was laid-out over the slash. A sounding was taken and recorded every 2 m from the roadside until the rear of the pile was reached. From these data, the average residue height for each successive 2 m point was calculated. Figures 3, 4 and 5 illustrate the profile, average height and maximum spread distance from the roadside of the spruce and jack pine residues, respectively.

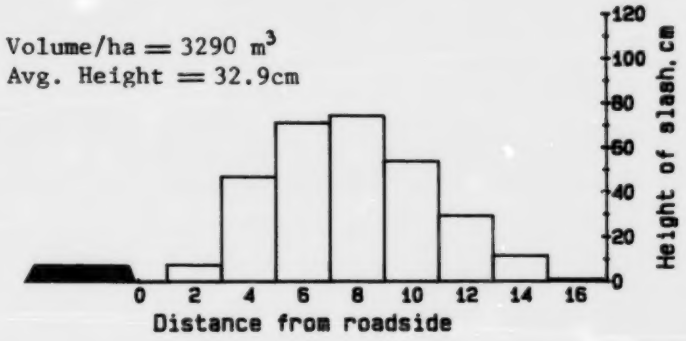


Figure 3. Spruce residue profile, Site 1.

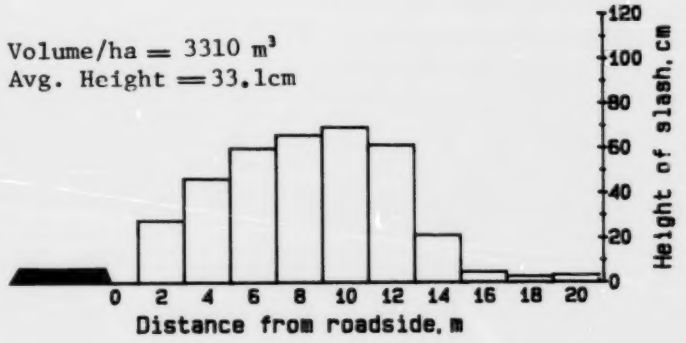


Figure 4. Spruce residue profile, Site 2.

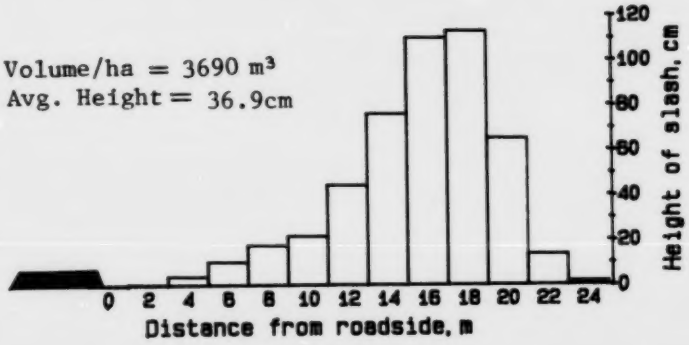


Figure 5. Jack pine residue profile, Site 2.

Figures 3 and 4 illustrate the profile of spruce residue concentrations at both test sites. The distribution and average height is similar for both areas. However, at Site 2, the residues were dispersed up to 20 m from the roadside compared to 16 m for Site 1.

The jack pine residues, see Figure 5, had a somewhat different profile. The average height was slightly higher at 36.9 cm, and the maximum distance from the roadside was 24 m. Based on the slash heights measured, a hectare of jack pine residues has a volume of 3690 m^3 while that of the spruce averaged 3300 m^3.

The author suggests that the similar results obtained from both test locations is reflective of the extraction machines used at each site. Both sites used skidders to extract wood to the landing, thus the volume of wood/residue per unit area of landing space is limited by the skidders' piling capabilities. Machines with higher payloads and/or greater piling capabilities will increase the wood/residue volumes per unit area of storage space. Therefore, the volume of residue/hectare would increase proportionally.

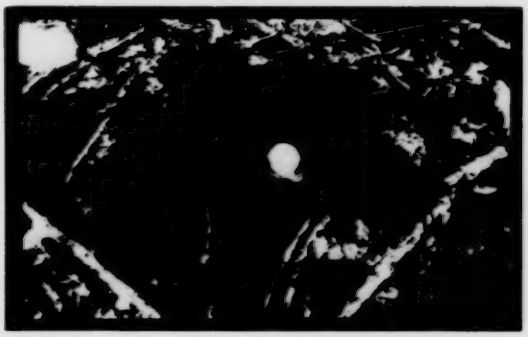
With a maximum boom reach of 18.3 m, the LRP is theoretically capable of gathering and comminuting all of the spruce residues at Site 1 and 90% at Site 2, but only 75% of the jack pine at Site 2. Therefore, to retrieve all of the residues sampled, the LRP's boom reach would have to be increased or delimbing operations would have to be modified to concentrate residues closer to the roadside.

Bulk Density

As stated by Silversides and Moodie[3], bulk density* is probably the most critical property of any load regarding the economics of its transport. Low density cargoes are more costly to transport because the weight capabilities of the transport vehicles cannot be realized. Apart from the transport implications, the weight per unit volume of roadside residues was required to project the productive capacity of the LRP in the field.

A number of spruce and jack pine samples were weighted to determine their bulk density (Figure 6). At random points, a 1 m x 1 m square was painted on the surface of the residue piles; a chain saw was then used to cut the slash for removal and weighing. After removal of all the residues to the ground level, the dimensions of the holes were measured and the cubic content was calculated along with the total weight of the materials removed. A total of 9 cut samples were included in the analysis, 5 spruce and 4 jack pine (Table 2).

Figure 6: A number of 1 m x 1 m holes were cut into a sample of spruce and jack pine residues. All materials were subsequently removed and weighed. The volume and total weight of material removed were calculated to determine the residue bulk density for each species.



---

* Bulk Density is the weight per unit volume of any material, including voids and water contained in it.

Table 2. Bulk Density of Spruce and Jack Pine Residues.

Sample #	Location	Volume, m^3	Weight, kg	Bulk Density kg/m^3
S 1	Site 1	0.819	142.27	173.68
S 2	"	1.100	228.63	207.85
S 3	"	1.316	175.45	133.32
S 4	"	1.301	358.63	275.66
S 5	Site 2	0.848	216.36	255.14
TOTAL		5.384	1121.34	208.27
Pj 6	Site 2	1.213	283.18	233.45
Pj 7	"	0.884	159.54	180.48
Pj 8	"	1.390	309.09	222.37
Pj 9	"	0.803	120.00	149.44
TOTAL		4.290	871.81	203.22

S = spruce, Pj = jack pine

By their very nature, residues produced from full-tree logging operations contain little solid wood volume as the materials are mainly comprised of branches and tops. Nonetheless, the average bulk density for the two species is 208 kg/m^3 for the spruce residues and 203 kg/m^3 for the jack pine. The reader is cautioned that the variation encountered in the bulk density sampling suggests that these values can not be considered as definitive, but rather reflect estimates specific to the study conditions. All weights relate to the green weight of materials as found in their natural state adjacent to the roadside.

Therefore, given the volume and bulk densities for each species, the number of tonnes of residue per hectare are presented in Table 3.

Table 3. Green Tonnes of Spruce and Jack Pine Residues/Hectare.

Species	Volume of residue, m^3/ha	Bulk density kg/m^3	Green tonnes/ha
Spruce	3300	208.27	687
Jack pine	3690	203.22	750

As shown in the above table, a hectare of spruce residue contained approximately 687 green tonnes of material. For the jack pine locations, the number of tonnes/hectare averaged 750, or 9% more than the spruce.

Solid Wood Content and Piece-Size Distribution

Once the residues were removed from each cut sample, the diameters of the solid wood exposed on the two cut faces parallel to the road were measured. These data enabled the solid wood content (% of total area) to be determined as well as providing a piece-size distribution for each species. Table 4 summarizes the results for each species.

Table 4: Percentage of Solid Wood Content and Piece-Size Distribution for Spruce and Jack Pine Residues.

	Spruce				Jack Pine			
Diameter class, cm	# Stems	%	Solid Wood cm^2	%	# Stems	%	Solid Wood cm^2	%
1	545	60.8	427.8	7.3	585	60.2	459.2	6.9
2	192	21.4	602.9	10.3	172	17.7	540.1	8.2
3	68	7.6	480.8	8.3	79	8.1	558.5	8.4
4	27	3.0	339.4	5.8	36	3.7	452.5	6.9
5	11	1.2	214.8	3.7	21	2.2	410.1	6.2
6	10	1.1	282.7	4.9	21	2.2	593.7	9.0
7	7	0.8	269.4	4.6	13	1.3	500.2	7.6
8	9	1.0	452.4	7.8	16	1.7	804.3	12.2
9	7	0.8	445.3	7.6	12	1.2	763.4	11.6
10	10	1.1	785.4	13.5	10	1.0	785.4	11.9
11	3	0.3	285.1	4.9	3	0.3	285.1	4.3
12	1	0.1	113.1	1.9	4	0.4	452.4	6.8
13	1	0.1	132.7	2.3				
14	4	0.5	615.8	10.6				
15	1	0.1	176.7	3.0				
16	1	0.1	201.1	3.5				
25*	2*	-	981.3*	-				
27*	1*	-	572.3*	-				
TOTAL WOOD	897	100.0	5825.4	100.0	972	100.0	6605.0	100.0
TOTAL FACE AREA, cm^2			104 287				83 990	
Solid Wood Content %			5.6				7.9	

* Omitted from sample as they are not considered slash material.

In terms of percentage of space occupied by solid wood per unit area (and subsequently per unit volume) of residue, the spruce and jack pine fibre content only represented 5.6% and 7.9%, respectively. The remaining area was made up of voids, and foliage especially near ground level.

From Table 4, the distribution of materials in terms of stem diameter is similar for both species. Approximately 80% of all the woody stems are made up of pieces no larger than 2 cm in diameter, but they represent only about 15% of the total solid fibre content. Conversely, 20% of the stems are over 2 cm in diameter, and they represent 85% of the total wood volume. The largest stem diameter measured was 16 cm for the spruce residues and 12 cm for the jack pine. One spruce sample contained stems of 25 and 27 cm in diameter, however these were not considered slash and thus were omitted from the sample. Piece-size distribution is also illustrated in Figure 7.

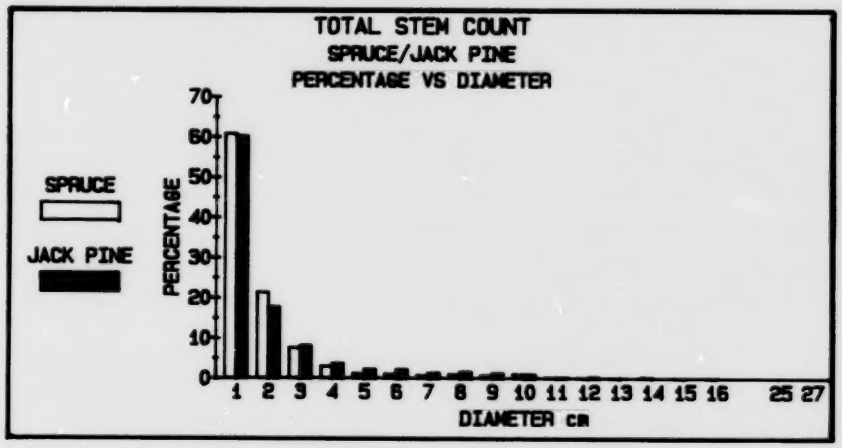


Figure 7. Piece-size distribution of spruce and jack pine residues.

As such, a processing unit must be capable of handling and comminuting residues up to 20 cm in diameter. Such a processing capability would be required for the majority of residues produced from full-tree logging operations in central and eastern Canada.

Moisture Content

Samples were selected from the residues removed during the bulk density tests to determine their moisture content. This enabled the moisture samples to be separated into a foliage and woody material category. It also permitted samples to be identified in terms of their location (depth) within the residue pile. To avoid loss in moisture, samples were bagged immediately and weighed as soon as possible to determine their green weight. A total of 71 individual samples were bagged and analyzed.

The samples were placed in drying ovens at 105°C until their weight became constant. The oven-dry weight was then recorded. Once the oven-dry weight of the samples was known, a moisture content was determined for each 25-cm depth class, each category of residue and each species.

The results are plotted in Figure 8. As illustrated, the moisture content of the foliage was about twice that of the woody material. The moisture content also increased with the residue depth. For example, the average moisture content for the woody material and foliage at the 25-cm depth is about 100% and 225%, respectively. At the 100-cm depth, the average rises to 150% for the woody material and about 275% for the foliage. It should be noted that all moisture samples were taken during the month of November, 1985. The average daily temperature was about -10°C and approximately 5 cm of snow was present on the residue piles. The snow was removed prior to bagging, however much of the material was already in a frozen and/or semi-frozen state. No comparative samples are available for summer.

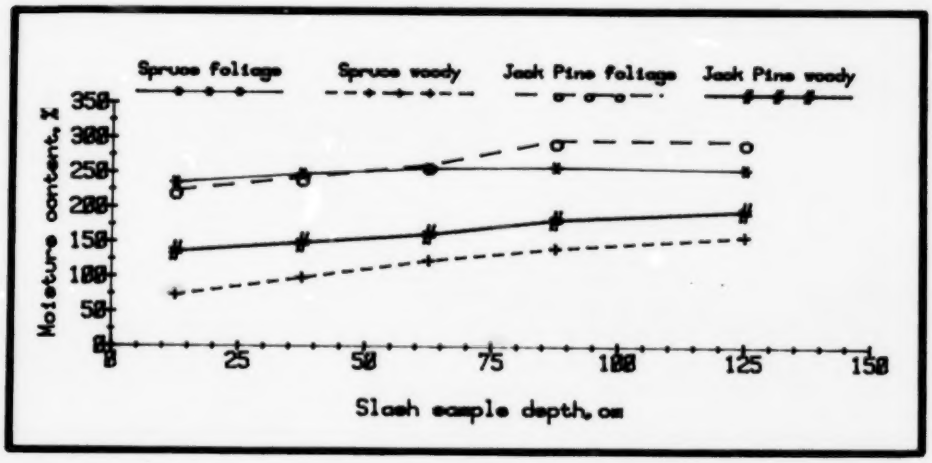


Figure 8: Percentage moisture content (oven-dry basis) of spruce and jack pine residue by category.

The composition of the residue piles changed substantially from the surface to ground level. At the surface, very little foliage remained attached to the limbs, thus mostly woody material was visible. At ground level, the voids were filled with the decomposing foliage, giving the residue a "peat like" texture. This natural stratification accelerates drying at the surface through increased sun and wind penetration, but develops an "ice house" effect at the lower levels, thus inhibiting drying. The high moisture content at ground level also suggests that the residues had reached their saturation point. In addition, by there very location, full-tree residues are susceptible to high moisture levels because they are often deposited in drainage ditches.

II. LOGGING RESIDUE PROCESSOR

Prototype LRP Test Results - November 1984

A series of tests were conducted on the prototype LRP[1] during the month of November, 1984 in the yard of Tenco Machinery Ltd., St. Valerien, Québec.

In brief, the processing rates ranged from a low of 9 tonnes per productive machine hour (PMH), where the shearing rotor showed insufficient power to handle large grapple loads, to 40 tonnes/PMH with moderate loads in sub-zero temperature conditions. The average loading time measured was 1.07 min/cycle. With an average load weight of 400 kg, the average processing rate was established at 22.5 tonnes/PMH. The blower threw processed particles from the pipe exit a distance ranging from 9 to 15 meters. Particle density was measured to be 367 kg/m^3.

Machine Modifications

The preliminary yard tests mentioned above revealed many areas where improvements could be made to bring the machine to a commercial level of performance. Recommendations centered on the need to improve the material flow and power characteristics of the shearing rotor and increasing the speed and grappling efficiency of the loader.

Proposed modifications to optimize material flow through the first reduction stage (shearing rotor) included:

- increasing engine power from 260 kW to 400 kW;
- redesigning the shearing rotor deck to facilitate the infeeding of residues;
- installing a reversing system on the shearing rotor to eliminate stalling and jamming; and
- changing the attack order of the 7 crescent-shaped rotor knives.

The latter two modifications were carried out during the autumn of 1985.

- Reversing of the shearing rotor is achieved by controlling the pump that powers the unit. The rotor pump can deliver partial or full flow in either direction and thus provide a counter rotation, if desired. A four-way solenoid valve and a pressure switch, set to activate at system relief pressure, detect a stall situation signaling the pump to reverse flow. A time delay relay holds the reverse action as long as required and on release, allows the rotor to resume its forward rotation. During the second production test, this function was manually actuated by an observer on the ground.

- Figure 9 illustrates the modified attack order of the crescent shaped rotor knives. In the original design, the center knife (No. 4) made first contact followed by Nos. 3 and 5 which were set back radially 23½°. Knife Nos. 2 and 6 were set back a further 23½° and the two remaining knives (Nos. 1 & 7) a further 23½°. This layout tended to push residues to the extremities of the rotor rather than discharging the fragmented residues centrally to the hammer mill for final reduction. In the modified attack order, the relative offset remained the same (23½°) however, the order was reversed. Knife Nos 1 and 7 now make initial contact, with the other cutting edges stepped back to No. 4 which trails.

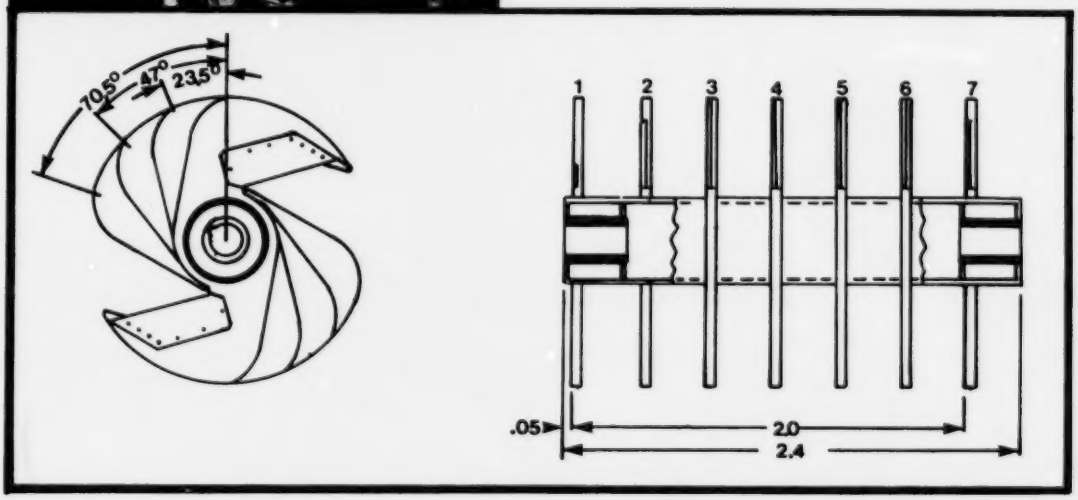


Figure 9. Modified attack order of the LRP's shearing rotor knives (Dimensions in meters).

Modified LRP Test Results - December 1985

Test Conditions

A second series of production tests were conducted on the modified LRP in early December, 1985. A sample of spruce residues, from Site 1 of the composition study, was transported from St. Michel des Saints to St. Valerien, Québec.

As shown in Figure 10, two 6.7 m semi-trailers were loaded using a Prentice 510 tree-length loader, and each truck was weighed to determine the exact quantity of residues transported (8.52 tonnes of spruce material). The average density of the transported residue was calculated to be 166 kg/m^3. In their natural state at roadside, these same residues averaged 203 kg/m^3, thus reloading decreased the materials' density by 37 kg/m^3 or 18%.

Figure 10. Two 6.7 m self-dumping, semi-trailers were used to transport spruce residues from the field (St. Michel des Saints) to the LRP in St. Valerien, Québec. The weight of materials transported and subsequently processed by the LRP totalled 8.52 tonnes.

Once off-loaded, the residue pile reached a height of 2 m and covered a total area of about 40 m^2. The LRP was positioned adjacent to the pile in such a manner that full boom extension was required to gather all the materials. This staged simulation provided data more representative of the machine's actual field performance capabilities.

Unlike the first test (November 1984), grapple loads were not bundled and weighed prior to processing. The operator simply grappled and processed materials until none remained. Times were recorded for each loading and processing cycle. A total of 35 grapple loads were required to process the 8.52 tonnes of residue material available, giving an average weight/grapple of 243 kg.

Processing Cycle

Table 5 summarizes the time required to process all the material.

Table 5. Summary of Processing Time Elements (based on 35 grapple loads).

Function	Total Time min	Avg. Time/ Cycle, min	%	Production tonnes/PMH
1. Processing	19.63	.56	48	26.04
delays				
2.1 Wait for loader	17.26	.49	42 } 52	-
2.2 Clean deck	3.96	.11	10	-
TOTAL	40.85	1.16	100	12.51

The total time required to comminute the 8.52 tonnes of residue was 40.85 minutes or 1.16 min/cycle. At this rate, the LRP was processing 12.51 tonnes/PMH. Potentially, the machine is capable of producing 26.04 tonnes/PMH by eliminating the amount of time spent waiting for the loader (42%) and cleaning the processing deck (10%).

Contrary to the experience in the first trial, no lack of power was encountered with the shearing rotor or hammer mill during the second trial. This suggests that the modified attack order of the shearing knives was effective. However, blockage did occur on one occasion in the discharge pipe after a large grapple load was processed. Jamming was restricted to the 90° elbow at the exit of the blower housing. Clearly, a redesign of the discharge pipe is required to accommodate the full capacity of the processing unit.

Loading Cycle

As previously stated, the LRP's processing unit was empty half the time, thereby indicating inadequate loading capability. Table 6 summarizes the LRP's loading time elements. For comparative purposes, Table 6 also includes the time required to load the two trucks in the field using the Prentice 510 tree-length loader. No relative difference in the loading time/cycle was measured between this test (1.15 min) and the initial LRP trial (1.07 min).

Table 6. Summary of the LRP and Prentice 510 Loading Time Elements.

Machine	LRP			Prentice 510		
Operator Rating	Novice			Excellent		
Number of Grapple Loads	35			28		
Kilogram/Grapple	243			304		
Element	Total Time min.	Avg./ Cycle min.	Tonnes/ PMH	Total Time min.	Avg./ Cycle min.	Tonnes/ PMH
1. Swing empty & search	16.06	0.46		4.00	0.14	
2. Load grapple	8.69	0.25		3.36	0.12	
3. Swing loaded & dump	8.89	0.25		7.86	0.28	
Sub-total	33.64	0.96	15.2	15.22	0.54	33.1
Delays						
4.1 Clean processing deck	5.96	0.17		-	-	
4.2 Re-load grapple	0.32	0.01		-	-	
4.3 Wait for processor	0.51	0.01		-	-	
4.4 Reposition load	-	-		6.24	0.22	
4.5 Bunch residues	-	-		1.66	0.06	
4.6 Compaction	-	-		16.24	0.58	
Total	40.43	1.15	12.6	39.36	1.40	13.0

The total time required to load the 8.52 tonnes of residue was comparable for both machines; 40.43 minutes or 12.6 tonnes/PMH for the LRP versus 39.36 minutes or 13.0 tonnes/PMH for the Prentice. However, the Prentice experienced considerable delay inherent to a truck-loading operation which would not have occurred in feeding a processing unit. Thus, in fact, the Prentice loader was actually more than twice as fast as the LRP when considering productive loading time only (excluding delays); 33.1 tonnes/PMH versus 15.2 tonnes/PMH. The average weight per load was comparable at 304 kg/grapple for the Prentice and 243 kg/grapple for the LRP. More importantly, the 243 kg/grapple is only one-half the rated capacity of the LRP's loader.

Apart from differences in machine design, operator skill was also considered to be a contributing factor in the LRP's low loader productivity. Operator experience varied from a couple hours (LRP) to seven years (Prentice) operating various loaders. Though the Prentice operator had no previous experience loading residues, his performance was considered to be excellent.

While operator differences are cited as contributing factors, it is clear that the LRP's loader and infeed platform require modifications to equal the processing capacity of the machine. To this end, the following modifications are suggested:

- increase grapple capacity to maintain an average payload of 500 kg/cycle;
- install better controls to increase operating efficiency (e.g., joysticks); and
- design and install a funnel-shaped, infeed chute to facilitate the positioning and entry of residues into the shearing rotor.

With an average load weight of 500 kg, the loading rate would be 26 tonnes/PMH even without modifying operator controls. The modified infeed chute would further enhance loader productivity by eliminating the time taken to clear the rotor platform. This would further increase loader productivity some 4 tonnes/PMH, giving a total loading rate of about 30 tonnes/PMH.

Blowing Distance of Discharged Residues

During the initial trial, the LRP's blower propelled the fragmented particles from the pipe exit a distance varying from 9 to 15 m. In this second test (with no wind), the processed residues were blown between 5 and 26 m from the discharge pipe. Figure 11 profiles the space occupied by the fragmented residues.

In terms of surface area, the processed residues covered approximately 152 m^2. The average pile height was about 14.6 cm, therefore, the volume occupied was 23.4 m^3. In the field, the same quantity of raw residue occupied approximately 45 m^3, thus the LRP doubled the bulk density of materials from 200 kg/m^3 to 360 kg/m^3. This coincides with the processed particle density as measured by filing a 1.5 m^3 box in the initial test (367 kg/m^3) and during this test (370 kg/m^3).

A doubling of the residues density is advantageous for transportation. However, should the further utilization (i.e., for energy) of such materials not be economical, the machine could be used as an alternative to burning for disposing of residues produced from full-tree logging operations. This application would require minor modifications to the unit's discharge pipe to further disperse the debris into the cutover area. Some means of pipe oscillation would also be required to blow the discharged residues over a wider area.

Greater dispersion is necessary to facilitate subsequent scarification and planting of these productive forest areas. Since light types of equipment such as patch scarifiers or disc trenchers can be used to treat full-tree harvested sites, the discharged residues should not exceed a depth of approximately 10 cm. Deeper residue concentrations would reduce the effectiveness of these types of scarifiers. More importantly, any adverse effects and/or benefits to seedling mortality and growth from such residues deserves serious investigation.

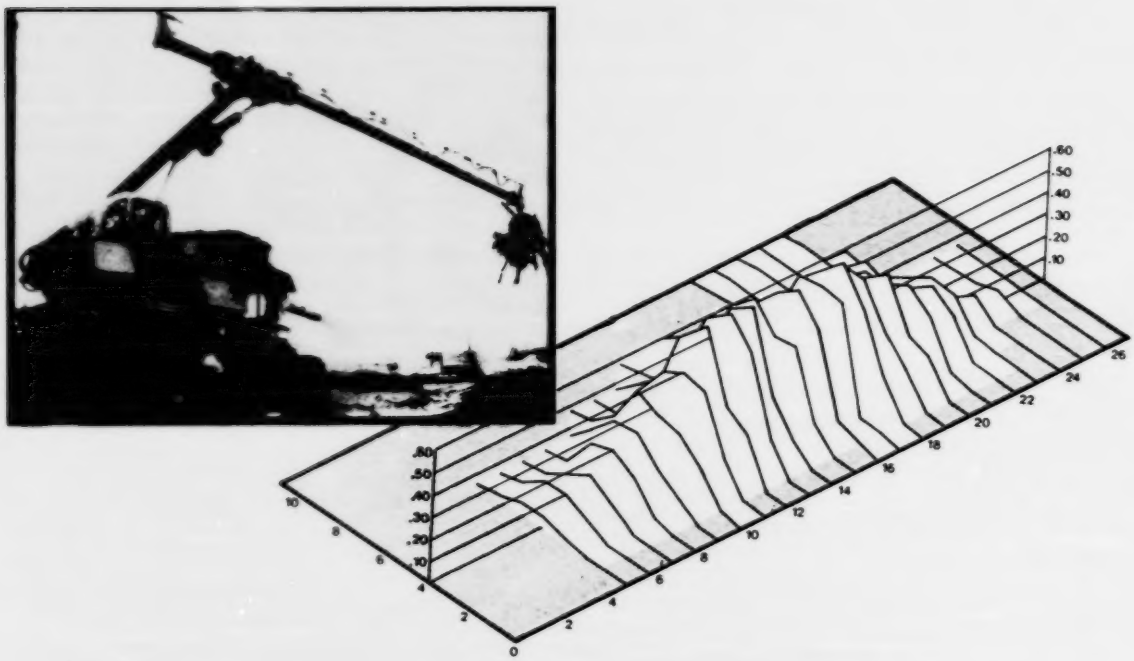


Figure 11. Discharged profile of fragmented residues (Dimensions in meters).

Expected Operating Costs

The machine costs presented below are based on a realistic range of costs that may be expected in view of the uncertainties entering into some of the estimated values. The total cost ($/green tonne) may be calculated from the following equation:

$$\$/\text{green tonne} = \left[\frac{I-R}{L} \left(1 + \frac{i\,(N+1)}{2}\right) + \frac{iR}{n} + M + W \right] \frac{100}{U} + F \left] \frac{1}{P}\right.$$

where:

Assumptions

I - Purchase Price, $	400,000
R - Residual Value, (10% of purchase price)	40,000
L - Economic Machine Life, SMH	16,000
i - Interest and Insurance, % (prime rate + 2% + 2% insurance)	15
N - Depreciation Period, Years	5
n - SMH/year, (6 months operation, double shift)	2,000
M - Maintenance Cost, $/SMH (100% of fixed costs, I/L)	25.00
W - Operator's Wage, $/SMH ($12.00/hr + 25% fringe)	15.00
U - Utilization*. %	70
F - Fuel and Lubrication, $/PMH (50 L/hr + 10% lube) x 0.53/L	29.15
P - Productivity, green tonnes/PMH	26.0

* A utilization of 70% is assumed to account for machine travel time between piles.

Using the above values in the equation gives the following results:

Total machine cost, $/PMH	$137.29
Production cost, $/green tonne	$ 5.28

Based on the above assumptions, a typical operating cost for the LRP working at roadside is $137.29/PMH or $5.28/green tonne (loaded in the transport trailer). On the surface, the cost per tonne appears to be acceptable. However, the costs do not look as favourable when calculating the expenditures ($3696/hectare) associated with recovering a hectare of productive forest area (average residue loading equals 700 green tonnes/ha). Clearly, the use of the LRP to reclaim such areas must be carried out in conjunction with wood energy operations.

CONCLUSIONS

The test results of the modified LRP demonstrated a potential production rate of 26 green tonnes/PMH or 4 tonnes better than the 1st prototype. However, low loader productivity limited the machine's actual processing rate to 12 green tonnes/PMH. Operator inexperience, slow cycle times and small grapple loads all contributed to the loader's inferior productivity. Clearly, loader productivity must be increased to match the processing capacity of the machine. Increasing the average payload per grapple from the measured 243 kg to the rated capacity of 500 kg would increase loader productivity to 26 tonnes/PMH. In addition, the design of a funnel-shaped chute to facilitate the positioning and entry of residues into the shearing rotor could further enhance loader productivity by 4 tonnes/PMH.

The modified attack order of the rotor knives proved effective as no jamming or lack of power was experienced with the processing function. The hammer mill and blower worked well, discharging the fragmented residues up to 26 m from the discharge pipe. However, should the use of such residues (i.e., for energy) not meet the needs of fibre users, the discharge pipe would require modifications to disperse the debris into the cutover area. Some means of pipe oscillation would also be needed to blow the discharged residues over a wider area. Greater dispersion is necessary to facilitate subsequent scarification and planting of these productive forest areas. Moreover, any adverse effect on seedling mortality and growth from such residues also deserves serious study.

The LRP increased the bulk density of full-tree residues from 200 kg/m^3 to 370 kg/m^3, thus benefiting subsequent transport operations. However, the high moisture contents (100% to 275% oven-dry basis) present in such residues is likely to require further drying prior to burning.

The residue piles varied in their spread distance from the roadside from 16 to 24 m, thus, requiring an increase in the LRP's boom reach of 18.3 m to gather all of the residues sampled. This would not be required in areas permitting the machine to operate off-road. Modifications to delimbing equipment and/or operating techniques could also be made to deposit residues closer to the roadside, but probably at the expense of reduced delimber productivity.

A machine operating cost of $5.28/green tonne (loaded in the transport trailer) was considered to be typical of the LRP's potential when working at roadside. On a tonne basis, the cost appears to be acceptable. However, based on an average loading of 700 green tonnes of residue per hectare, this represents over $3500 to reclaim one hectare of productive forest land. As such, it is unlikely that machines, such as the LRP, will be used to reclaim productive forest areas unless the cost per hectare can be offset by the energy value of the processed residues.

Moreover, the economics of utilizing forest biomass for energy does not look as promising in today's energy climate of reducing oil prices. Thus, future efforts should be directed towards improving existing equipment and/or techniques (i.e., raking, burning) to treat full-tree residue piles at roadside.

REFERENCES

1. DuSault, A. 1985. The Development and Trial of Two Prototype Machines (RECUFOR and LRP) for Forest Biomass Recovery. ENFOR report p-210. For. Eng. Res. Inst. of Can. report SR-36, 37 pp.

2. Canuel, B. 1984. Mesure des pertes de superficies forestières productives suite à la récolte de la matière ligneuse au Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, 22 p.

3. Silversides, C.R., Moodie, R.L. 1985. Transport of Full Trees over Public Roads in Eastern Canada - A State of the Art Report. ENFOR report P-312. For. Eng. Res. Inst. of Can. report SR-35, 71 pp.

APPENDIX A

CONVERSION TABLE

1 cm (centimeter)	0.394 inch
1 ha (hectare)	2.471 acres
1 m (meter)	3.281 feet
1 m^3 (cubic meter)	35.315 cubic feet
1 kg (Kilogram)	2.205 pounds
1 kW (Kilowatt)	1.34 horse power
1 km (Kilometer)	0.621 mile

$$\frac{9}{5}{}^{\circ}C + 32 = {}^{\circ}F$$

FERIC

FOREST ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE OF CANADA
INSTITUT CANADIEN DE RECHERCHES EN GÉNIE FORESTIER

Composition des résidus d'exploitation des arbres entiers et essais du prototype de la fragmenteuse-broyeuse de résidus (LRP)

Wayne Novak

Composition des résidus d'exploitation des arbres entiers et essais du prototype de la fragmenteuse-broyeuse de résidus (LRP)

Wayne Novak

Rapport spécial N^{0} RS-38

Octobre 1986

© Copyright 1986, Institut canadien de recherches en génie forestier

ISSN 0706-8468

Contrat DSS N° 1SS85-00113
Dossier DSS 55SS.01K02-5-0150

Contractant:

Institut canadien de recherches en génie forestier
143, Place Frontenac
Pointe-Claire (Québec)
H9R 4Z7
Tél: (514) 694-1140

Autorité scientifique:

M. Brad Sutherland
Centre de recherches forestières des Grands-Lacs, SCF
Case postale 490
Sault-Ste-Marie, Ontario
P6A 5M7
Tél: (705) 949-9461

Agent des marchés scientifiques:

M. R.N. Finlayson
Direction des sciences et des services professionnels, MAS
12C1 Place du Portage
11, rue Laurier
Hull (Québec)
K1A 0S5
Tél: (819) 997-7349

Ce rapport est disponible aux endroits suivants:

Institut canadien de recherches
en génie forestier
143, Place Frontenac
Pointe-Claire (Québec)

Secrétariat ENFOR
Service canadien des forêts
Ottawa, Ontario
K1A 0E7

This report is also available in English.

AVANT-PROPOS

Le présent rapport a été préparé dans le cadre du programme ENFOR (Énergie de la forêt), mis sur pied par le Service canadien des forêts vers la fin des années '70, dans le but de promouvoir le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables et de réduire la dépendance de notre pays envers les combustibles fossiles.

En 1985, un rapport conjoint ENFOR/FERIC a été publié, décrivant la mise au point et l'essai de deux machines en vue de récupérer la biomasse issue des exploitations forestières et de la transformer à des fins énergétiques. La machine originale, appelée le RECUFOR, était conçue pour fragmenter les résidus sur le parterre de coupe même. Le second prototype, appelé Logging Residue Processor (LRP), ou fragmenteuse-boyeuse de résidus, et conçu pour traiter des résidus concentrés en bordure de route, a été mis à l'essai à l'automne de 1984. Par la suite un contrat ENFOR, qui visait à modifier le LRP pour en accroitre la capacité de production, fut octroyé à FERIC vers la fin de 1985. Le présent rapport décrit les résultats des essais du LRP modifié.

Au cours de la même période, le Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec (MER) accordait à FERIC un contrat en vue d'étudier la composition (densité, teneur en humidité, dimensions des morceaux, etc.) des résidus provenant d'une exploitation d'arbres entiers transportés en bordure de route et d'évaluer l'aspect économique de l'utilisation du LRP comme alternative au brûlage de ces résidus. Les résultats de cette étude font également partie du rapport.

Le lecteur ne doit pas oublier que les résultats que nous présentons sont particuliers aux sites d'essais, aux méthodes d'exploitation et aux opérations étudiés, et ne sauraient s'appliquer qu'avec prudence.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
AVANT-PROPOS	i
SOMMAIRE	iii
INTRODUCTION	1
FRAGMENTEUSE-BROYEUSE DE RÉSIDUS (LRP)	3
Description de la machine	3
Sites des essais	4
RÉSULTATS DES ÉTUDES	
I. **COMPOSITION DES RÉSIDUS**	6
• Volume des résidus	6
• Densité en vrac	8
• Contenu en bois solide et distribution dimensionnelle des morceaux	10
• Teneur en humidité	11
II. **FRAGMENTEUSE-BROYEUSE DE RÉSIDUS (LRP)**	13
• Résultats des essais du prototype du LRP - novembre 1984	13
• Modifications de la machine	13
• Résultats des essais du LRP modifié - décembre 1985	15
• Conditions des essais	15
• Cycle de fragmentation	16
• Cycle de chargement	16
• Distance à laquelle sont soufflés les résidus évacués	18
• Coûts de fonctionnement prévus	20
CONCLUSIONS	21
BIBLIOGRAPHIE	23
ANNEXE A - TABLE DE CONVERSION	24

SOMMAIRE

Le programme du gouvernement canadien sur l'Énergie de la forêt (ENFOR) avait pour mandat de promouvoir le développement et l'utilisation de sources d'énergie renouvelables. En ce qui a trait à l'industrie des produits forestiers, cela impliquait la mise au point de machines et de systèmes en vue de la récupération et de la transformation de la biomasse forestière à des fins énergétiques.

Compte tenu des changements survenus dans le contexte énergétique mondial et des nouvelles tendances dans les méthodes de récolte dans notre pays, l'intérêt qui se portait d'abord sur la récupération de la biomasse abandonnée sur les parterres de coupe s'est tourné vers l'utilisation des résidus produits en bordure de route, à la suite des opérations d'ébranchage d'arbres entiers. En 1984, dans le cadre du programme ENFOR, le Logging Residue Processor (LRP), ou fragmenteuse-broyeuse de résidus, a été développé par l'Institut canadien de recherches en génie forestier (FERIC) pour ramasser et traiter les résidus d'exploitation d'arbres entiers. Les résultats des premiers essais permettaient de conclure que de nombreuses modifications étaient nécessaires pour amener le LRP à un niveau commercial de production. À cette fin, vers la fin de 1985, FERIC se vit accorder un contrat pour apporter des modifications spécifiques à la machine, et pour procéder à un second essai sur sa performance.

Durant la même période, le Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec (MER) procédait à des expériences sur les techniques de brûlage des résidus de coupe, dans le but de remettre en valeur les superficies de forêt productive recouvertes par les piles de résidus issus de l'exploitation des arbres entiers. Les risques d'incendie et les contraintes opérationnelles reliées au brûlage à ciel ouvert ont toutefois amené le MER à rechercher d'autres méthodes de traiter ces matériaux. Dans cette optique, le MER a accordé à FERIC un contrat en vue de mesurer les caractéristiques physiques des résidus issus de l'exploitation d'arbres entiers, et d'évaluer l'aspect économique de l'utilisation du LRP comme alternative au brûlage de ces résidus.

L'essai de la machine et les activités de terrain ont eu lieu en novembre et en décembre 1985. Les mesures en vue de déterminer la composition des résidus (densité, teneur en humidité, dimensions des morceaux) on été prises sur un petit échantillon de résidus d'épinette et de pin gris. Les sites échantillonnés avaient été exploités durant l'été 1984, soit par des abatteurs manuels, soit par des abatteuses mécaniques. Les arbres avaient été transportés en bordure de route par des débardeurs à câble et à pince. Des ébrancheuses Tanguay, Harricana ou Denis procédaient à l'ébranchage mécanique en bordure de route.

Les résidus pouvaient s'étendre à une distance variant de 16 à 24 m de la route; il était donc nécessaire d'augmenter la portée de la flèche du LRP (18,3 m) pour pouvoir ramasser tous les résidus échantillonnés. À défaut de changer l'équipement d'ébranchage et les méthodes de travail, il faudrait disposer de flèches de longueurs variables pour être à même de répondre aux divers besoins des utilisateurs.

Le volume de résidus dans les piles en bordure de route était approximativement de 3500 m^3/ha et leur densité en vrac se situait à un peu plus de 200 kg/m^3, ce qui donnait environ 700 tonnes vertes/ha.

La distribution dimensionnelle des résidus était semblable pour les deux essences. Environ 80% de tout le matériel ligneux était constitué de morceaux qui n'avaient pas plus de 2 cm de diamètres, mais ils ne représentaient que 15% du contenu total en fibre. Les diamètres les plus élevés étaient de 12 cm et de 16 cm pour les échantillons d'épinette et de pin gris respectivement.

Les échantillons de résidus choisis pour l'analyse de la teneur en humidité ont été séparés en deux catégories: le feuillage et le matériel ligneux. Chaque échantillon était de plus identifié quant à sa situation (profondeur) dans la pile de résidus. La teneur en humidité du feuillage était deux fois plus grande que celle du matériel ligneux. Comme on pouvait s'y attendre, la teneur en humidité augmentait aussi avec la profondeur dans la pile. La teneur en humidité moyenne (base sèche) du matériel ligneux et du feuillage, à une profondeur de 25 cm, atteignait 100% et 225%, respectivement. À une profondeur de 100 cm, la moyenne s'élevait à 150% (matériel ligneux) et 275% (feuillage). Tous les échantillons de teneur en humidité ont été pris durant le mois de novembre, alors qu'une bonne partie des résidus étaient déjà gelés ou à demi gelés. Nous ne disposons d'aucun échantillon comparable pris en été.

Les résultats des essais du LRP modifié ont montré un potentiel de productivité de 26 tonnes vertes par heure-machine productive (HMP), soit 4 tonnes de plus que le premier prototype. Cependant la faible productivité de la chargeuse limitait le taux réel de fragmentation de la machine à 12 tonnes vertes/HMP. Le manque d'expérience de l'opérateur, la lenteur des temps du cycle, et les petites charges du grappin étaient tous des éléments qui contribuaient à la faible productivité de la chargeuse. On pourrait atteindre un taux de chargement de 26 tonnes par HMP en augmentant à 500 kg la charge moyenne par grappin, actuellement mesurée à 243 kg. L'installation d'une goulotte d'alimentation qui faciliterait le positionnement et l'entrée des résidus dans le tambour de cisaillement augmenterait encore la productivité de la chargeuse d'environ quatre tonnes/HMP.

Le souffleur du LRP dispersait les résidus fragmentés jusqu'à 26 m de la goulotte d'évacuation. Si l'utilisation ultérieure de cette biomasse (c'est-à-dire à des fins énergétiques) devait se révéler non économique, la goulotte d'évacuation demanderait des modifications pour pouvoir disperser les débris sur le parterre de coupe. De plus il faudrait prévoir un moyen de faire osciller la goulotte de façon à assurer la dispersion des résidus sur une plus vaste superficie (épaisseur maximale de 10 cm), facilitant ainsi les opérations subséquentes de scarifiage et de plantation.

Compte tenu du potentiel du LRP en bordure de route, on prévoyait un coût de fonctionnement de 5,28 $/tonne verte (dans la remorque). À première vue, le coût par tonne semble acceptable. Toutefois les coûts n'apparaissent plus aussi raisonnables quand on détermine les dépenses (3 696 $/ha) qu'implique la récupération d'un hectare de superficie forestière productive (la quantité moyenne de résidus égale 700 tonnes vertes/ha). De toute évidence, l'utilisation du LRP pour remettre en valeur ces superficies doit se faire conjointement avec l'utilisation du bois à des fins énergétiques.

De plus, l'aspect économique de l'utilisation de la biomasse forestière pour la production d'énergie ne semble guère prometteur dans le contexte énergétique actuel où l'on assiste à une baisse des prix du pétrole. Ainsi les efforts devraient à l'avenir s'orienter vers l'amélioration des méthodes et/ou de l'équipement actuels (c'est-à-dire épandage au râteau, brûlage) permettant de traiter les piles de résidus en bordure de route.

INTRODUCTION

Vers la fin des années '70, le Service canadien des forêts a mis sur pied le programme ENFOR (Énergie de la forêt). À cette époque, plusieurs conditions favorisaient la récupération des résidus d'exploitation à des fins énergétiques. Tout d'abord, compte tenu de la hausse constante des prix du pétrole à l'échelle mondiale et des réserves limitées de notre pays en combustibles fossiles, les résidus d'exploitation sont devenus plus intéressants au point de vue économique et sont apparus comme un substitut possible aux sources traditionnelles d'énergie. Deuxièmement, des inventaires ayant pour but d'évaluer la quantité de résidus abandonnés après l'exploitation ont montré que ces matériaux constituaient une importante source potentielle d'énergie renouvelable. C'est ainsi que le programme ENFOR a été établi dans le but d'encourager l'utilisation des sources renouvelables d'énergie et de développer la technologie nécessaire à la récupération de la biomasse forestière.

Au moment de la mise sur pied d'ENFOR, environ 80% de la récolte totale de bois au Canada était effectuée selon les méthodes d'exploitation en bois courts et par troncs entiers. Comme ces deux méthodes laissent d'importantes quantités de résidus sur le parterre de coupe, la priorité fut donnée au développement d'une technologie permettant de récupérer les résidus sur les coupes mêmes.

En 1979, dans le cadre du programme ENFOR, FERIC reçut le mandat d'entreprendre un programme de recherche et de développement en vue de la récupération et de la transformation de la biomasse forestière à des fins énergétiques. De façon plus précise, FERIC devait développer une machine expérimentale permettant de récupérer les résidus d'exploitation sur le parterre de coupe même, d'augmenter la densité en vrac des matériaux récupérés, et d'acheminer ces résidus en bordure de route en vue d'un transport ultérieur. FERIC se lança donc dans la conception et la construction d'une machine expérimentale. Cette phase, de même que les phases subséquentes, furent confiées par contrat à la firme Corporation de recherche Logging Development de Montréal. Les plans de la machine furent terminés en 1981 et le prototype appelé RECUFOR, fut mis à l'essai sur le terrain durant l'été 1982.

Au début des années '80, plusieurs changements se produisirent dans le contexte énergétique dans son ensemble; par ailleurs de nouvelles tendances dans les méthodes de récolte suscitèrent davantage d'intérêt pour l'utilisation de la biomasse produite en bordure de route à la suite de l'ébranchage des arbres entiers, que pour la récupération de la biomasse abandonnée sur les parterres de coupe; l'orientation des méthodes et de l'équipement de récupération de la biomasse forestière se trouva donc modifiée. En 1984, on modifia les plans du RECUFOR de façon à ce qu'il puisse ramasser les résidus d'exploitation en bordure de route et les fragmenter. Le nouveau prototype, appelé Logging Residue Processor (LRP) ou fragmenteuse-broyeuse de résidus, fut mis à l'essai à l'automne 1984. Vers la fin de 1985, les résultats des essais ont été publiés dans un rapport conjoint ENFOR/FERIC[1] intitulé:

"Développement et mise à l'essai des prototypes RECUFOR et LRP en vue de la récupération de la biomasse forestière". Selon les conclusions du rapport, de nombreuses modifications étaient nécessaires pour améliorer la capacité de production du LRP. À cette fin, un autre contrat ENFOR fut accordé à FERIC pour apporter des modifications spécifiques à la machine et procéder à un second essai de production. Le présent rapport décrit les résultats des essais du LRP modifié.

Au cours des quelques dernières années, le Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec (MER) s'est préoccupé sans cesse davantage de la quantité de résidus produits en bordure de route à la suite de l'exploitation d'arbres entiers. Ainsi concentrés en bordure de route, ces résidus se dégradent lentement réduisant d'autant la superficie de terrain productif disponible au reboisement. Les efforts dans le but de remettre ces superficies en valeur comprenaient entre autres des techniques expérimentales de brûlage des déchets. Les risques d'incendie et les contraites opérationnelles reliées au brûlage à ciel ouvert ont cependant suscité un intérêt pour le développement de machines comme le LRP, susceptibles de traiter ces résidus. Le MER a accordé à FERIC un contrat en vue de mesurer la composition des résidus d'arbres entiers et d'évaluer la faisabilité d'utiliser le LRP comme alternative au brûlage des déchets. Les résultats de cette étude font également partie du présent rapport.

FRAGMENTEUSE-BROYEUSE DE RÉSIDUS (LRP)

Description de la machine

La fragmenteuse-broyeuse de résidus (LRP) est une machine automotrice qui comporte un double système de fragmentation; elle est conçue pour réduire les résidus générés en bordure de route ou à un endroit central, sous une forme plus appropriée au transport. Comme alternative au brûlage, le LRP peut également servir à fragmenter et à disperser les déchets en bordure de route, augmentant ainsi la superficie de terrain forestier productif disponible pour les opérations subséquentes de préparation du terrain et de reboisement.

Équippé d'une flèche coulissante et d'un grappin, le LRP saisit les résidus et les dépose dans un tambour de cisaillement. Les résidus cisaillés sont ensuite introduits dans un broyeur à marteaux traditionnel et le broyat obtenu est soufflé par une goulotte d'évacuation dans un conteneur, ou encore il est simplement dispersé sur le terrain. Voici une description des principales composantes du LRP avec leurs dimensions, tel qu'illustré à la figure 1:

1. Châssis - Plusieurs parties du RECUFOR ont été réutilisées pour la construction du LRP, d'où une réduction des coûts de construction et d'assemblage. Le châssis du débardeur traditionnel Clark 880, sur lequel était monté le RECUFOR, a été converti pour porter les composantes du LRP. Les dimensions hors-tout de la machine étaient de 12,25 m de longueur, 4,11 m de largeur et 5,08 m de hauteur. Le poids total est de 36 000 kg.

2. Moteur - 240 kW, puissance nette au volant SAE.

3. Tambour de cisaillement - le tambour de cisaillement du RECUFOR a également été adapté au LRP. Monté horizontalement, le tambour comporte sept couteaux (voir figure 9) conçus pour sectionner les résidus bruts en morceaux plus petits et plus homogènes avant leur entrée dans le broyeur à marteaux. Le principe de l'alimentation verticale permet de traiter les résidus, peu importe leur orientation.

4. Broyeur à marteaux - Un broyeur à marteaux Jeffrey 45 WB est monté sur le LRP et constitue l'étape finale de fragmentation. L'homogénéité des matériaux produits devrait en faciliter ultérieurement la manutention, le séchage et la combustion. De plus, un broyeur à marteaux résiste mieux à la présence de matières étrangères qu'une déchiqueteuse.

5. Souffleur horizontal - Un souffleur horizontal, d'une puissance nominale de 37 kW, projette les résidus provenant du broyeur à marteaux dans une goulotte d'évacuation, laquelle est conçue avec un coude à 45° pour faciliter le chargement du camion ou du conteneur.

6. Chargeuse à flèche coulissante - Le LRP est muni d'une flèche coulissante de 13,6 m et d'un grappin, assurant en fait une portée de travail de 18,3 m; la capacité du grappin est d'environ 500 kg. La flèche et la cabine sont montées sur une tourelle.

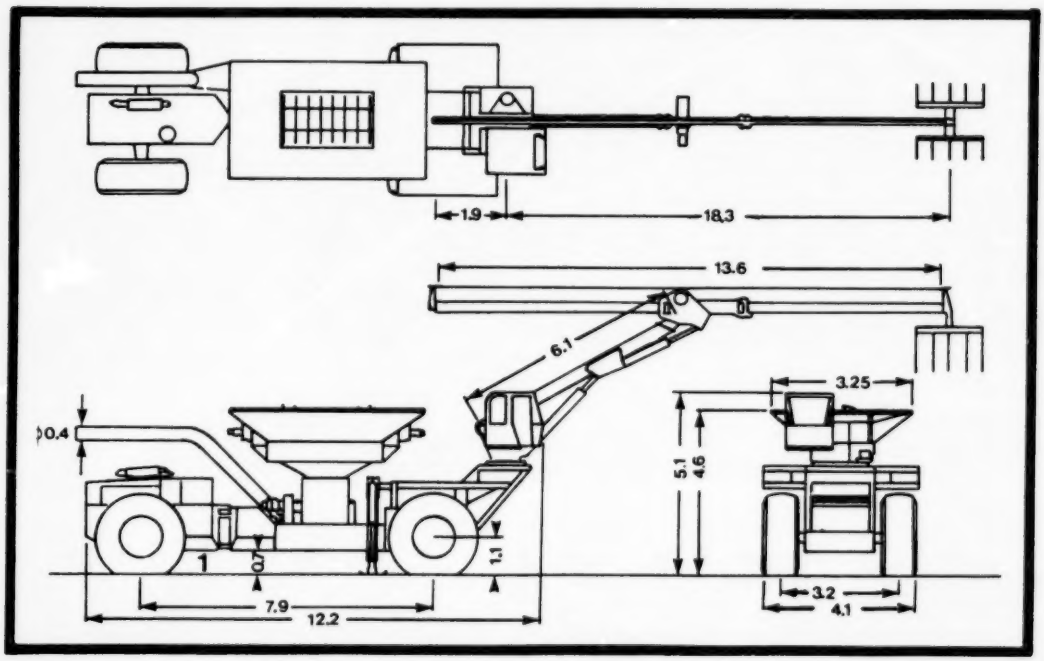


Figure 1. Fragmenteuse-broyeuse de résidus (LRP). (Les dimensions sont en mètres).

On trouvera après la section sur la composition des résidus, une description des modifications apportées au LRP, de même que les résultats de production obtenus par la suite (voir page 13).

Sites des essais

Les activités de FERIC sur le terrain ont eu lieu durant le mois de novembre 1985, et se sont bornées à mesurer la composition (densité en vrac, teneur en humidité, dimensions des morceaux, volume) de résidus produits en bordure de route, à la suite de l'exploitation d'arbres entiers.

L'étude était limitée à deux aires. La première, située sur les concessions des Scieries St-Michel Inc. (St-Michel-des-Saints, Québec), présentait uniquement des concentrations de résidus d'épinette. La deuxième, sur les concessions de CIP Inc. (Camp Pensive, Division de Maniwaki, Québec), offrait des échantillons de résidus de pin gris et d'épinette. On trouvera au tableau 1 un sommaire des volumes des peuplements et des dimensions moyennes des arbres dans chaque site d'essais.

Tableau 1. Conditions moyennes des peuplements*

Site d'essais	distribution des essences, % des tiges	volume/ arbre, m^3	volume marchand des peuplements, m^3/ha	volume exploité, m^3/ha
Site 1 (St-Michel)	épinette, 70%	0,17	65	65
	bouleau à papier et tremble, 30%	0,47	70	0
Site 2 (Pensive)	pin gris, 100%	0,163	140	140
Site 2 (Pensive)	épinette, 100%	0,08	77	77

* Toutes les données proviennent des dossiers de la compagnie.

Comme on peut le voir au tableau ci-dessus, la composition du peuplement dans le site 1 comprenait un mélange d'épinette et d'essences feuillues. Toutefois seulement l'épinette avait été récoltée. Dans le site 2, les superficies échantillonnées étaient des peuplements purs de pin gris et d'épinette. Le volume exploité par hectare était dans le même ordre de grandeur pour les superficies d'épinette, soit 65 et 77 m^3/ha. Quant au peuplement de pin gris, il contenait 140 m^3/ha, soit pratiquement le double du volume de l'épinette.

Tous les arbres ont été récoltés et ébranchés au cours de l'été 1984. Dans le site 1, un débardeur à câble transportait les arbres d'abord abattus manuellement. Dans le site 2, les arbres étaient abattus et groupés mécaniquement, puis acheminés en bordure de route à l'aide de débardeurs à câble ou à pince.

Pour l'ébranchage mécanique (voir figure 2), on se servait dans le site 1 d'ébrancheuses Tanguay, et d'ébrancheuses Harricana et Denis au site 2. Toutes les ébrancheuses travaillaient en se tenant sur la route même, et déposaient donc les résidus à proximité de la route. En plus, elles plaçaient les troncs ébranchés par-dessus les piles de résidus pour faciliter le mesurage et le chargement des camions, ce qui produisait en même temps un certain compactage des résidus.

Figure 2. On se servait d'ébrancheuses comme la Tanguay (à gauche) à St-Michel et l'Harricana (à droite) au Camp Pensive. Le fait pour l'ébrancheuse de travailler en restant sur la surface de la route maintient les concentrations de résidus à proximité de la route, et facilite ainsi les traitements ultérieurs.

I. COMPOSITION DES RÉSIDUS

Les objectifs de l'étude ne visaient aucunement à évaluer la quantité de résidus générés par hectare exploité. D'après une étude effectuée par le MER[2] et basée sur l'inventaire de 32 374 hectares, environ 5% de la superficie forestière productive est couverte de piles de résidus déposés en bordure de route par des ébrancheuses mécaniques, à la suite d'exploitations par arbres entiers.

L'étude portait plutôt de façon spécifique sur les piles de résidus elles-mêmes, décrivant la configuration des piles, leur volume par unité de superficie (hectare) et leur densité en vrac. Elle était conçue de façon à permettre de déterminer le poids (tonnes) de résidus par unité de superficie, et d'obtenir ainsi une estimation de la productivité du LRP pour la remise en valeur du territoire forestier.

Volume des résidus

Au total, 3,0 kilomètres de résidus ont été mesurés, dont 0,75 kilomètre de pin gris et 2,25 kilomètres d'épinette. On s'est servi d'une grille d'échantillonnage pour mesurer la hauteur des résidus à partir du niveau du sol, à divers points sur toute la longueur et la largeur des résidus. À chaque 15 m le long de la surface frontale de la pile, on menait une ligne perpendiculaire par-dessus les résidus. On prenait alors un sondage tous les 2 m à partir du bord de la route jusqu'à l'arrière de la pile et on enregistrait les résultats. La hauteur moyenne des résidus pour chaque point successif de 2 m était calculée à partir de ces données. Les figures 3, 4 et 5 illustrent le profil, la hauteur moyenne et la distance de dispersion maximale depuis le bord de la route, pour les résidus d'épinette et de pin gris.

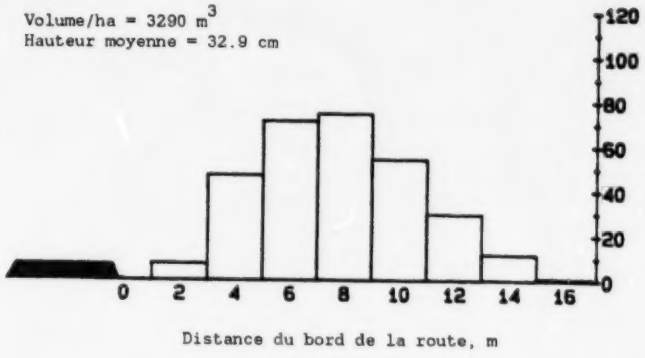

Volume/ha = 3290 m3
Hauteur moyenne = 32.9 cm
Hauteur des résidus cm
0 20 40 60 80 100 120
0 2 4 6 8 10 12 14 16
Distance du bord de la route, m

Figure 3. Profil des résidus d'épinette, Site 1

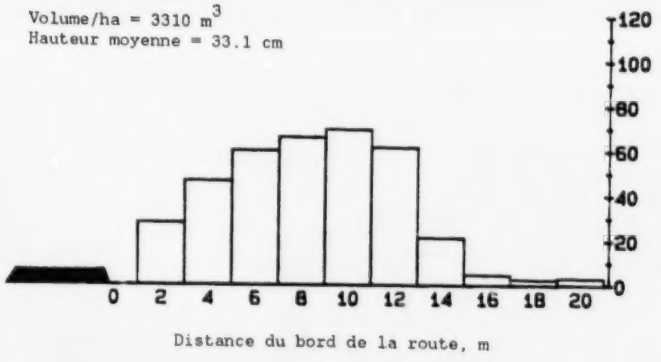

Volume/ha = 3310 m3
Hauteur moyenne = 33.1 cm
Hauteur des résidus, cm
0 20 40 60 80 100 120
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20
Distance du bord de la route, m

Figure 4. Profil des résidus d'épinette, Site 2.

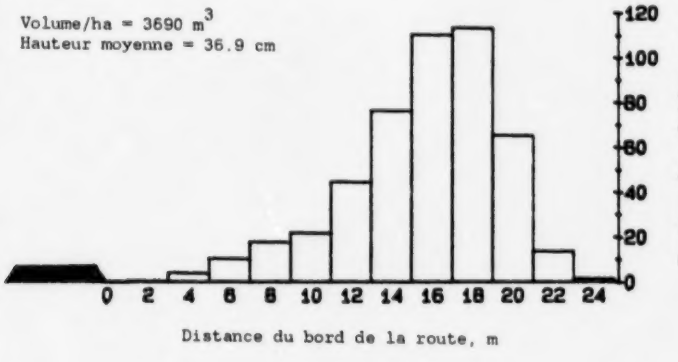

Volume/ha = 3690 m3
Hauteur moyenne = 36.9 cm
Hauteur des résidus, cm
0 20 40 60 80 100 120
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24
Distance du bord de la route, m

Figure 5. Profil des résidus de pin gris, Site 2.

Les figures 3 et 4 illustrent le profil des concentrations de résidus d'épinette dans les deux aires d'études. La distribution et la hauteur moyenne sont semblables aux deux endroits. Toutefois dans le site 2, les résidus étaient dispersés jusqu'à 20 m du bord de la route comparativement à 16 m dans le site 1.

Les résidus de pin gris (voir figure 5) présentaient un profil légèrement différent. La hauteur moyenne était un peu plus élevée, soit 36,9 cm, et la distance maximale atteignait 24 m du bord de la route. D'après les hauteurs de résidus mesurées, les résidus de pin gris sur un hectare ont un volume de 3690 m^3, alors que les résidus d'épinette occupent un volume moyen de 3300 m^3/hectare.

Selon l'auteur, le fait que les résultats obtenus soient semblables dans les deux aires d'études est attribuable aux machines de récolte utilisées dans chacun des sites. Aux deux endroits, on se servait de débardeurs pour acheminer le bois à la jetée; le volume de bois ou de résidus par unité de superficie à la jetée est donc limité par la capacité d'empilage des débardeurs. Des machines ayant une plus forte charge utile et/ou une plus grande hauteur d'empilage augmenteraient les volumes de bois ou de résidus par unité de superficie. On aurait par conséquent une augmentation proportionnelle de résidus/hectare.

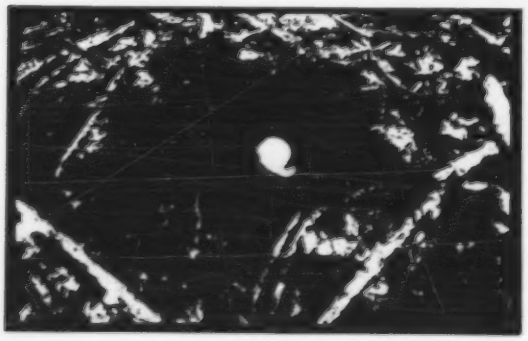
Avec une portée maximale de 18,3 m, le LRP est théoriquement capable de ramasser et de fragmenter tous les résidus d'épinette du site 1 et 90% de ceux du site 2, mais seulement 75% des résidus de pin gris du site 2. Pour pouvoir récupérer tous les résidus échantillonnés, il faudrait augmenter la portée de la flèche du LRP, ou bien modifier les opérations d'ébranchage de façon à concentrer les résidus plus près de la route.

Densité en vrac

Ainsi que l'ont mentionné Silversides et Moodie[3], la densité en vrac* est sans doute la propriété la plus critique d'une charge, si on considère la rentabilité économique du transport. Les cargaisons à faible densité coûtent plus cher à transporter, parce qu'elles ne peuvent atteindre la capacité de poids des véhicules. Il était nécessaire de connaitre le poids par unité de volume des résidus en bordure de route, non seulement à cause de ses implications dans le transport, mais aussi pour prévoir la capacité de production du LRP sur le terrain.

Un certain nombre d'échantillons d'épinette et de pin gris ont été pesés pour déterminer leur densité en vrac (figure 6). Un carré de 1 m x 1 m était peint à la surface des piles de résidus, à des endroits pris au hasard. Une scie à chaine servait alors à découper le carré de résidus pour l'enlever et le peser. Après avoir retiré tous les résidus jusqu'au niveau du sol, on mesurait les dimensions des trous et on calculait le cubage, ainsi que le poids total des matériaux enlevés. L'analyse portait sur 9 échantillons découpés de cette façon, 5 d'épinette et 4 de pin gris (tableau 2).

Figure 6. Un certain nombre de trous de 1 m x 1 m ont été découpés dans un échantillon de résidus d'épinette et de pin gris. Tous les matériaux en ont par la suite été retirés et pesés. Le volume et le poids total des matériaux enlevés ont été calculés pour déterminer la densité en vrac des résidus pour chacune des essences.



---

* La densité en vrac est le poids par unité de volume d'un matériau, y compris les vides et l'eau qu'il contient.

Tableau 2. Densité en vrac des résidus d'épinette et de pin gris

Échantillon no	emplacement	volume, m^3	poids, kg	densité en vrac kg/m^3
ep 1	site 1	0,819	142,27	173,68
ep 2	"	1,100	228,63	207,85
ep 3	"	1,316	175,45	133,32
ep 4	"	1,301	358,63	275,66
ep 5	site 2	0,848	216,36	255,14
TOTAL		5,384	1121,34	208,27
pig 6	site 2	1,213	283,18	233,45
pig 7	"	0,884	159,54	180,48
pig 8	"	1,390	309,09	222,37
pig 9	"	0,803	120,00	149,44
TOTAL		4,290	871,81	203,22

ep = épinette, pig = pin gris

De par leur nature même, les résidus produits à la suite d'exploitations d'arbres entiers contiennent un faible volume de bois solide, puisque les matériaux sont principalement constituées de branches et de cimes. La densité en vrac moyenne atteint néanmoins 208 kg/m^3 pour les résidus d'épinette et 203 kg/m^3 pour ceux de pin gris. Le lecteur doit prendre note que, compte tenu de la variation rencontrée dans l'échantillonnage, les valeurs de densité en vrac ne peuvent être considérées comme définitives, mais qu'elles représentent plutôt des estimations particulières aux conditions de l'étude. Tous les poids se rapportent au poids vert des matériaux tels que trouvés à leur état naturel à proximité du bord de la route.

On trouvera au tableau 3 le nombre de tonnes de résidus par hectare, compte tenu du volume et des densités en vrac pour chaque essence.

Tableau 3. Tonnes vertes de résidus d'épinette et de pin gris par hectare

Essence	volume des résidus, m^3/ha	densité en vrac kg/m^3	tonnes vertes/ha
épinette	3300	208,27	687
pin gris	3690	203,22	750

Comme le montre le tableau ci-dessus, un hectare de résidus d'épinette contient environ 687 tonnes vertes de matériel. Pour le pin gris, le nombre de tonnes/hectare était en moyenne de 750, ou 9% de plus que pour l'épinette.

Contenu en bois solide et distribution dimensionnelle des morceaux

Après avoir retiré les résidus de chaque trou-échantillon, on mesurait les diamètres des morceaux de bois solide exposés sur les deux faces découpées parallèlement à la route. Ces données ont permis de déterminer le contenu en bois solide (% de la superficie totale) et d'établir la distribution dimensionnelle des morceaux pour chaque essence. Le tableau 4 donne le sommaire des résultats par essence.

Tableau 4. Contenu en bois solide (pourcentage) et distribution dimensionnelle des morceaux pour les résidus d'épinette et de pin gris

	épinette				pin gris			
classe de diamètre, cm	nombre de tiges	%	bois solide, cm^2	%	nombre de tiges	%	bois solide, cm^2	%
1	545	60,8	427,8	7,3	585	60,2	459,2	6,9
2	192	21,4	602,9	10,3	172	17,7	540,1	8,2
3	68	7,6	480,8	8,3	79	8,1	558,5	8,4
4	27	3,0	339,4	5,8	36	3,7	452,5	6,9
5	11	1,2	214,8	3,7	21	2,2	410,1	6,2
6	10	1,1	282,7	4,9	21	2,2	593,7	9,0
7	7	0,8	269,4	4,6	13	1,3	500,2	7,6
8	9	1,0	452,4	7,8	16	1,7	804,3	12,2
9	7	0,8	445,3	7,6	12	1,2	763,4	11,6
10	10	1,1	785,4	13,5	10	1,0	785,4	11,9
11	3	0,3	285,1	4,9	3	0,3	285,1	4,3
12	1	0,1	113,1	1,9	4	0,4	452,4	6,8
13	1	0,1	132,7	2,3				
14	4	0,5	615,8	10,6				
15	1	0,1	176,7	3,0				
16	1	0,1	201,1	3,5				
25*	2*	-	981,3*	-				
27*	1*	-	572,3*	-				
TOTAL SUPERFICIE	897	100,0	5825,4	100,0	972	100,0	6605,0	100,0
TOTAL DES DÉCOUPES, cm^2			104 287				83 990	
contenu en bois solide, %			5,6				7,9	

* Ces morceaux n'ont pas été considérés comme des résidus et ont été omis de l'échantillon.

En termes de pourcentage d'espace occupé par le bois solide par unité de surface (et par conséquent par unité de volume) de résidus, le contenu en fibre pour l'épinette et pour le pin gris ne représentait que 5,6% et 7,9%, respectivement. Le reste de la surface était constitué de vides, et de feuillage surtout au niveau du sol.

On voit au tableau 4 que la distribution des matériaux, en ce qui a trait au diamètre des tiges, est semblable pour les deux essences. Environ 80% de toutes les tiges ligneuses sont constituées de morceaux dont le diamètre ne dépasse pas 2 cm, mais elles ne représentent qu'approximativement 15% du contenu total de fibre solide. Réciproquement, 20% des tiges dépassent 2 cm de diamètre et représentent 85% du volume de bois. La plus grosse tige mesurée avait un diamètre de 16 cm dans les résidus d'épinette et de 12 cm dans le pin gris. Un des échantillons d'épinette contenait des tiges de 25 et de 27 cm de diamètre; elles ne furent toutefois pas considérées comme des résidus et ne firent pas partie de l'échantillon. La figure 7 illustre également la distribution dimensionnelle des morceaux.

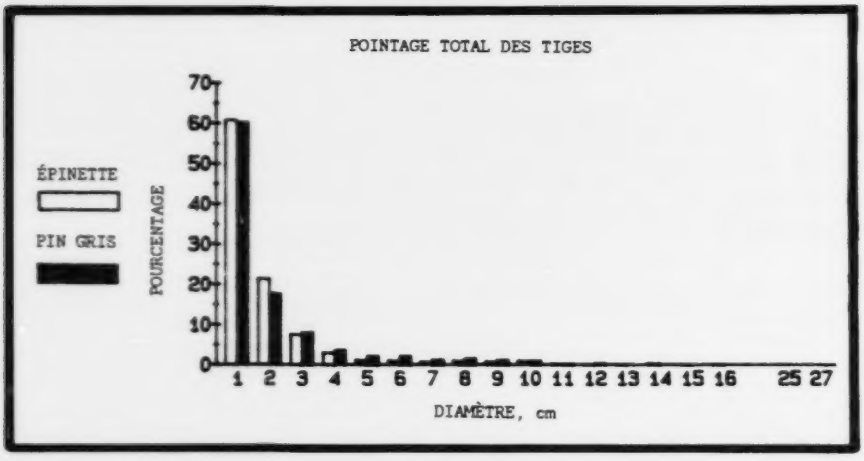


Figure 7. Distribution dimensionnelle des morceaux dans les résidus d'épinette et de pin gris.

Il ressort de cette étude qu'une machine destinée à manutentionner et à fragmenter les résidus devrait être capable d'accepter des tiges dont le diamètre peut atteindre 20 cm. Cette capacité de traitement devrait être nécessaire pour la plupart des résidus produits dans les exploitations d'arbres entiers dans le centre et l'est du Canada.

Teneur en humidité

Des échantillons ont été choisis parmi les résidus prélevés durant les tests de densité en vrac, pour en déterminer la teneur en humidité. On pouvait ainsi séparer les échantillons en deux catégories: feuillage et matériel ligneux. Cela permettait aussi d'identifier les échantillons quant à leur emplacement (profondeur) dans la pile de résidus. Afin d'éviter toute perte d'humidité, les échantillons étaient immédiatement mis en sacs et pesés aussitôt que possible pour en déterminer le poids vert. Au total, 71 échantillons individuels ont été mis en sacs et analysés.

Les échantillons ont été placés dans des séchoirs à 105^{0}C jusqu'à ce que leur poids devienne constant. Le poids anhydre a alors été enregistré. Une fois connu le poids anhydre des échantillons, on déterminait la teneur en humidité pour chaque classe de profondeur de 25 cm, chaque catégorie de résidus et chaque essence.

Les résultats sont pointés à la figure 8. Comme le montre l'illustration, la teneur en humidité du feuillage était environ le double de celle du matériel ligneux. De plus, la teneur en humidité augmentait avec la profondeur des résidus dans la pile. Par exemple, à la profondeur de 25 cm, la teneur en humidité moyenne du matériel ligneux et du feuillage est d'environ 100% et 225%, respectivement. À une profondeur de 100 cm, la moyenne s'élève à 150% pour le matériel ligneux et à environ 275% pour le feuillage. Il est à noter que tous les échantillons d'humidité ont été pris durant le mois de novembre 1985. La température moyenne le jour était d'environ -10°C et près de 5 cm de neige recouvrait les piles de résidus. La neige fut enlevée avant la mise en sacs; toutefois une bonne partie du matériel était déjà gelé ou à demi gelé. On ne dispose pas d'échantillons comparables en été.

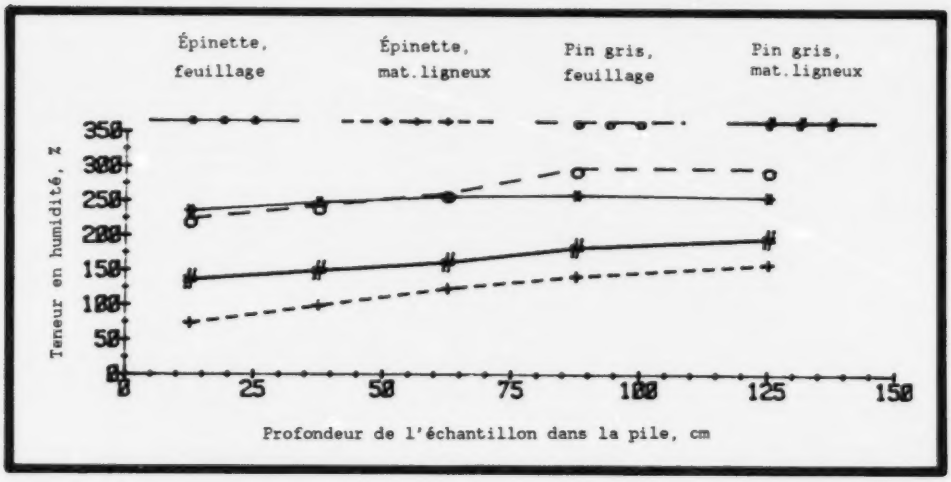


Figure 8. Pourcentage de teneur en humidité (base anhydre) des résidus d'épinette et de pin gris, par catégorie.

La composition de piles de résidus variait de façon substantielle depuis la surface jusqu'au niveau du sol. En surface, il ne restait que très peu de feuillage attaché aux branches; on y voyait donc surtout du matériel ligneux. Au niveau du sol, les vides se trouvaient remplis de feuillage en décomposition, donnant aux résidus une texture ressemblant à celle de la tourbe. Cette stratification naturelle accélère le processus de séchage en surface en favorisant la pénétration du soleil et du vent, mais développe un effet de "glacière" aux niveaux inférieurs, ce qui empêche le séchage. La forte teneur en humidité au niveau du sol laisse croire que les résidus avaient atteint leur point de saturation. Ajoutons que, par leur situation même, les résidus d'arbres entiers sont sujets à des niveaux élevés d'humidité, puisqu'ils sont souvent déposés dans les fossés d'écoulement des eaux.

II. FRAGMENTEUSE-BROYEUSE DE RÉSIDUS (LRP)

Résultats des essais du prototype du LRP - novembre 1984

Au cours du mois de novembre 1984, le prototype du LRP[1] a subi une série d'essais dans le parc de Machinerie Tenco Ltée, à St-Valérien, Québec.

En résumé, les taux de fragmentation variaient d'une valeur faible de 9 tonnes par heure-machine productive (HMP), quand le tambour de cisaillement montrait une puissance insuffisante au traitement de grosses prises de grappin, à 40 tonnes/HMP avec des charges moyennes dans des conditions de température inférieures à zéro. Les temps moyen de chargement a été mesuré à 1,07 min/cycle. Le poids moyen d'une charge étant de 400 kg, le taux moyen de traitement a été établi à 22,5 tonnes/HMP. Le souffleur projetait les particules fragmentées hors du tuyau d'évacuation à une distance variant de 9 à 15 mètres. On mesura la densité des particules à 367 kg/m^3.

Modifications de la machine

Les essais préliminaires sur parc, mentionnés ci-dessus, ont révélé plusieurs points qu'il serait possible d'améliorer pour assurer à la machine un niveau de performance acceptable commercialement. Les recommandations portaient sur la nécessité d'améliorer les caractéristiques de puissance et de débit de matériel du tambour de cisaillement, et d'augmenter la vitesse et la capacité de prise de la chargeuse.

Les modifications proposées pour optimiser le débit de matériel durant la première étape de fragmentation (tambour de cisaillement) comprenaient les éléments suivants:

- augmentation de la puissance du moteur de 260 kW à 400 kW;
- nouvelle conception de la plateforme du tambour de cisaillement de façon à faciliter l'alimentation des résidus;
- installation d'un système de marche arrière sur le tambour de cisaillement pour empêcher les arrêts et les blocages; et
- changement dans l'ordre d'attaque des 7 couteaux du tambour en forme de croissants.

Les deux dernières modifications on été effectuées au cours de l'automne 1985.

- La marche arrière du tambour de cisaillement s'obtient en contrôlant la pompe qui alimente l'unité. La pompe du tambour peut fournir un débit total ou partiel dans l'une ou l'autre direction et ainsi assurer au besoin la rotation en sens contraire. Une soupape à quatre voies et à commande par solénoïde et un manostat, réglés pour fonctionner à la pression du clapet de décharge du système, détectent les blocages indiquant à la pompe de renverser le débit. Un relais à excitation temporisée maintient l'inversion de débit aussi longtemps que nécessaire; sur relâche, il permet au tambour de reprendre sa rotation avant. Durant le second essai de production, cette fonction était commandée manuellement par un observateur sur le terrain.

- La figure 9 illustre les modifications dans l'ordre d'attaque des couteaux en forme de croissants. Dans le plan original, le couteau du centre (no 4) assurait le premier contact, suivi par les nos 3 et 5 qui étaient décalés de 23½° vers l'arrière. Les couteaux 2 et 6 étaient décalés d'un autre 23½° et les deux derniers couteaux (nos 1 et 7) d'un autre 23½°. Cet agencement avait tendance à pousser les résidus vers les extrémités du tambour, plutôt que d'évacuer les fragments obtenus au centre vers le broyeur à marteaux, pour la réduction finale. Avec l'agencement modifiée, le décalage relatif demeure le même (23½°) mais l'ordre d'attaque a été inversé. Les couteaux nos 1 et 7 assurent le contact initial; les autres couteaux sont décalés jusqu'au no 4 qui termine la séquence.

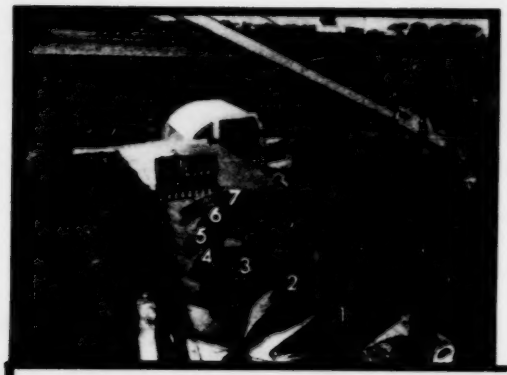
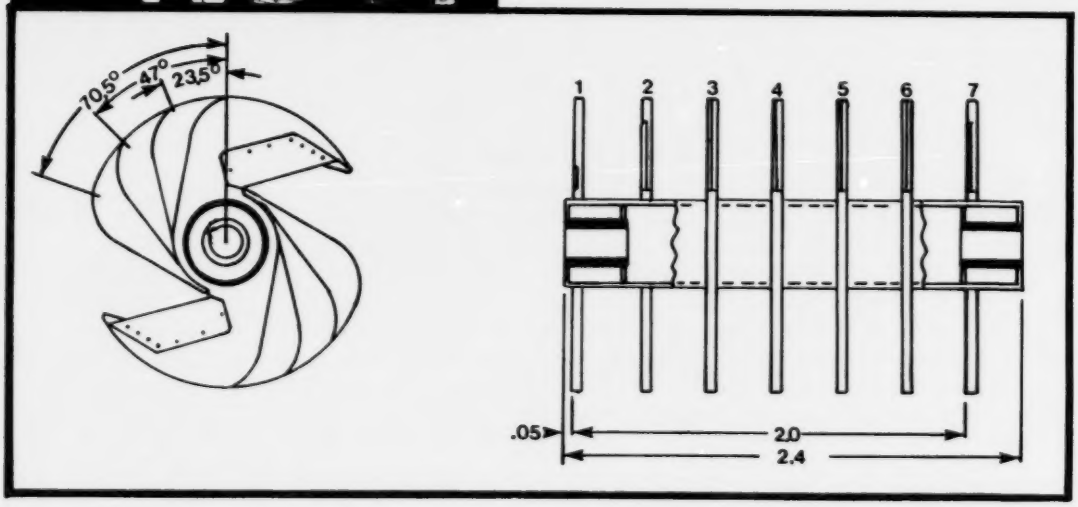


Figure 9. Agencement modifiée des couteaux du tambour de cisaillement du LRP (Les dimensions sont en mètres).



Résultats des essais du LRP modifié - décembre 1985

Conditions des essais

Une deuxième série d'essais de production a eu lieu sur le LRP modifié, au début de décembre 1985. Un échantillon de résidus d'épinette, provenant du site 1 dans l'étude sur la composition des résidus, a été transporté de St-Michel-des-Saints à St-Valérien, Québec.

Comme le montre la figure 10, deux semi-remorques de 6,7 m ont été chargées à l'aide d'une chargeuse Prentice 510, munie d'une flèche à talon; chaque camion a été pesé pour déterminer la quantité exacte de résidus transportés. La quantité totale était de 8,52 tonnes de résidus d'épinette. On a calculé que leur densité moyenne était de 166 kg/m^3. À leur état naturel en bordure de route, ces mêmes résidus avaient une densité moyenne de 203 kg/m^3. Le fait de les recharger diminuait donc la densité des matériaux de 37 kg/m^3, soit de 18%.

Figure 10. Deux semi-remorques de 6,7 m, à déversement automatique, servirent au transport des résidus d'épinette du site d'études de St-Michel-des-Saints jusqu'au LRP, à St-Valérien, Québec. Les matériaux transportés et fragmentés par le LRP avaient un poids total de 8,52 tonnes.

Une fois déchargée, la pile de résidus atteignait une hauteur de 2 m et couvrait une superficie totale d'environ 40 m^2. Le LRP était positionné à proximité de la pile de façon à ce que la pleine extension de la flèche soit nécessaire pour ramasser tous les matériaux. Cette mise en scène fournissait des données plus représentatives des capacités réelles de performance de la machine sur le terrain.

Contrairement au premier essai (novembre 1984), les prises de grappin n'avaient pas été attachées ni pesées avant la fragmentation. L'opérateur ramassait simplememnt les matériaux et les traitait, jusqu'à épuisement. On a enregistré les temps de chaque cycle de chargement et de fragmentation. Trente-cinq prises de grappin ont été nécessaires pour traiter les 8,52 tonnes de résidus disponibles, ce qui donnait un poids moyen par grappin de 243 kg.

Cycle de fragmentation

Le tableau 5 donne un sommaire du temps requis pour traiter tous les matériaux.

Tableau 5. Sommaire des temps élémentaires de fragmentation (basé sur 35 prises de grappin).

Fonction	temps total, min.	temps moyen/ cycle, min.	%	production, tonnes/HMP
1. fragmentation	19,63	0,56	48	26,04
temps morts				
2.1 attente de la chargeuse	17,26	0,49	42	-
2.2 nettoyage de la plateforme	3,96	0,11	10	-
TOTAL	40,85	1,16	100	12,51

Le temps total nécessaire pour fragmenter les 8,52 tonnes de résidus était de 40,85 minutes, soit 1,16 min/cycle. À cette vitesse, le LRP traitait 12,51 tonnes/HMP. Théoriquement, la machine est capable de produire 26,04 tonnes/HMP, si on élimine le temps passé à attendre la chargeuse (42%) et à nettoyer la plateforme (10%).

Contrairement au premier essai, ni le tambour de cisaillement ni le broyeur à marteaux n'ont démontré un manque de puissance au cours du second essai. Il semble donc que la modification apportée à la synchronisation des couteaux de cisaillement ait été efficace. Toutefois la goulotte d'évacuation s'est bloquée à une occasion après le traitement d'une grosse prise de grappin. Le blocage était limité au coude à 90° à la sortie du logement du souffleur. Il est évident que le tuyau d'évacuation devra être modifié pour répondre aux besoins de l'unité de fragmentation quand elle fonctionne à pleine capacité.

Cycle de chargement

Ainsi qu'il a déjà été mentionné, l'unité de fragmentation était vide la moitié du temps, indiquant par là que la capacité de chargement était inadéquate. Le tableau 6 donne un sommaire des temps élémentaires de chargement du LRP. Pour fins de comparaison, le tableau 6 inclut également le temps nécessaire pour charger les deux camions sur le terrain à l'aide de la chargeuse à talon Prentice 510. De plus, aucune différence relative dans le temps ou le cycle de chargement n'a été mesurée entre ce test (1,15 min.) et le premier essai du LRP (1,07 min.).

Tableau 6. Sommaire des temps élémentaires de chargement du LRP et de la Prentice 510

Machine Évaluation de l'opérateur Nombre de prise de grappin Kilogramme/grappin	LRP novice 35 243			Prentice 510 excellent 28 304		
élément	temps total min.	moy./ cycle min.	tonnes/ HMP	temps total min.	moy./ cycle min.	tonnes/ HMP
1. rotation à vide et recherche	16,06	0,46		4,00	0,14	
2. saisie de la charge	8,69	0,25		3,36	0,12	
3. rotation en charge et déchargement	8,89	0,25		7,86	0,28	
total partiel	33,64	0,96	15,2	15,22	0,54	33,1
temps morts						
4.1 nettoyage de la plateforme	5,96	0,17		-	-	
4.2 rechargement du grappin	0,32	0,01		-	-	
4.3 attente de la fragmenteuse	0,51	0,01		-	-	
4.4 repositionnement de la charge	-	-		6,24	0,22	
4.5 groupement des résidus	-	-		1,66	0,06	
4.6 compactage	-	-		16,24	0,58	
total	40,43	1,15	12,6	39,36	1,40	13,0

Le temps total requis pour charger les 8,52 tonnes de résidus était comparable pour les deux machines; 40,43 minutes ou 12,6 tonnes/HMP pour le LRP et 39,36 minutes ou 13,0 tonnes/HMP, pour la Prentice. Toutefois la Prentice avait rencontré de nombreux temps morts, propres à une opération de chargement de camion, qui ne se seraient pas produits lors de l'alimentation d'une unité de fragmentation. Aussi la chargeuse Prentice était-elle en fait plus de deux fois plus rapide que le LRP, si on tient compte uniquement du temps productif de chargement (excluant le temps morts): 33,1 tonnes/HMP par rapport à 15,2 tonnes/HMP. Le poids moyen par charge était comparable, soit 304 kg/grappin pour la Prentice et 243 kg/grappin pour le LRP. Soulignons qu'une charge de 243 kg/grappin ne représente que la moitié de la capacité nominale de la chargeuse du LRP.

À part les différences dans la conception de la machine, la compétence de l'opérateur semblait également un facteur qui contribuait à la faible productivité de la chargeuse du LRP. L'expérience de l'opérateur variait de

quelques heures (LRP) à sept ans (Prentice) de travail avec diverses chargeuses. Même si l'opérateur de la Prentice ne possédait aucune expérience préalable dans le chargement des résidues, il était considéré comme excellent.

Les différences entre les opérateurs sont des facteurs qui ont certainement contribué à la faible productivité du LRP, mais il est évident que la chargeuse du LRP et la plateforme d'alimentation devront subir des modifications pour atteindre la capacité de fragmentation de la machine. À cette fin, nous suggérons les modifications suivantes:

- augmenter la capacité du grappin de façon à maintenir une charge utile moyenne de 500 kg/cycle;

- installer des commandes plus efficaces afin d'accroître le rendement de l'opération (par exemple, des télémanipulateurs); et

- concevoir et installer une goulotte d'alimentation en forme d'entonnoir, dans le but de faciliter le positionnement et l'entrée des résidus dans le tambour de cisaillement.

Avec une charge ayant un poids moyen de 500 kg, le taux de chargement serait de 26 tonnes/HMP, même sans modifier les commandes de l'opérateur. Les modifications de la goulotte d'alimentation favoriseraient davantage la productivité de la chargeuse en éliminant le temps nécessaire au nettoyage de la plateforme du tambour. On augmenterait ainsi la productivité de la chargeuse de 4 tonnes/HMP additonnelles, soit un taux total de chargement d'environ 30 tonnes/HMP.

Distance à laquelle sont soufflés les résidus évacués

Au cours du premier essai, le souffleur du LRP projetait les particules fragmentées depuis la goulotte jusqu'à une distance variant de 9 à 15 m. Durant le second essai (sans vent), les résidus fragmentés se trouvaient soufflés de 5 à 26 m du tuyau d'évacuation. La figure 11 montre un profil de l'espace occupé par les résidus fragmentés.

Les résidus fragmentés couvraient approximativement 152 m^2 de superficie. La hauteur moyenne de la pile était d'environ 14,6 cm; ils occupaient donc un volume de 23,4 m^3. Sur le terrain, la même quantité de résidus bruts occupait pratiquement 45 m^3. Ainsi le LRP a doublé la densité en vrac des matériaux, de 200 kg/m^3 à 360 kg/m^3, ce qui coïncide avec la densité des particules fragmentées, mesurée en remplissant une boîte de 1,5 m^3 au cours de l'essai initial (367 kg/m^3) ainsi que du second essai (370 kg/m^3).

Le fait de doubler la densité des résidus est avantageux pour le transport. Cependant, si l'utilisation ultérieure (à des fins énergétiques) de ces matériaux se révélait non économique, la machine pourrait présenter une alternative au brûlage des résidus issus des opérations de récolte d'arbres entiers. Cette application demanderait des modifications mineures au tuyau d'évacuation pour permettre de disperser les débris plus loin sur l'aire de coupe. Il faudrait également un mécanisme d'oscillation du tuyau pour souffler les résidus sur une étendue plus vaste.

Une plus grande dispersion est nécessaire pour faciliter les opérations ultérieures de scarifiage et de plantation de ces superficies forestières productives. Comme on peut utiliser de l'équipement léger comme des scarificateurs à disques ou à action ponctuelle pour traiter les sites où ont été récoltés les arbres entiers, les résidus évacués ne devraient pas dépasser une épaisseur d'environ 10 cm. Des concentrations plus épaisses réduiraient l'efficacité de ce type de scarificateurs. Il serait des plus important d'effectuer des recherches approfondies sur tout effet, favorable ou défavorable, de ces résidus sur la croissance ou la mortalité des semis.

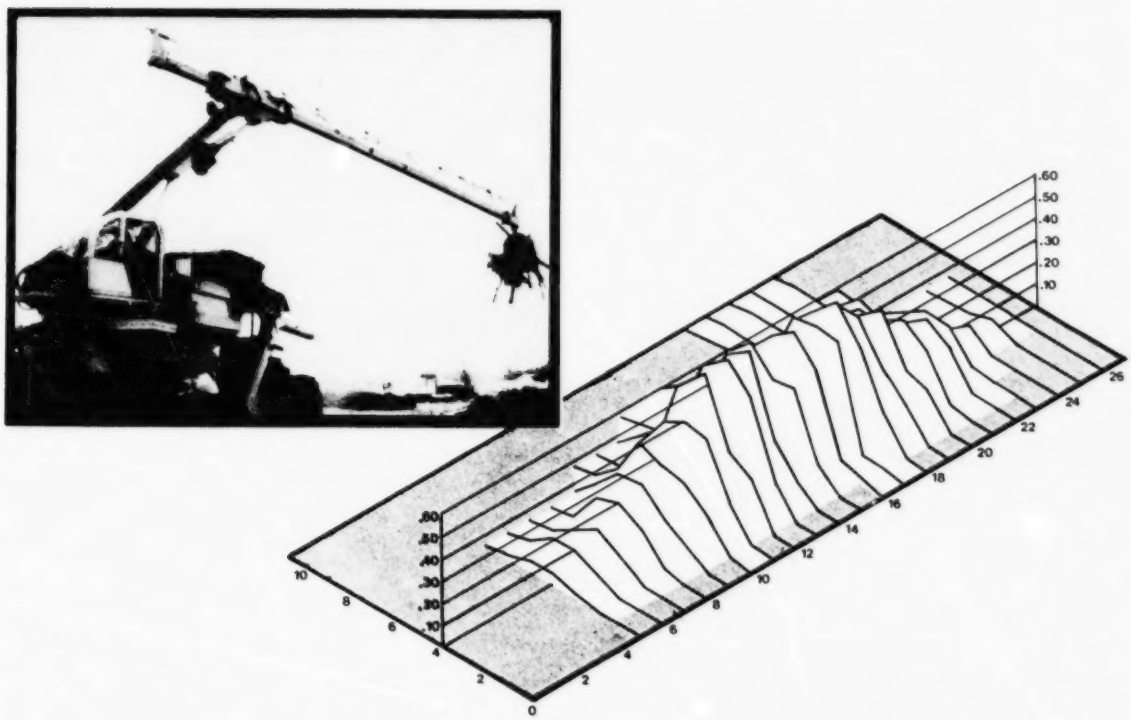


Figure 11. Profil d'évacuation des résidus fragmentés (Dimensions en mètres).

Coûts de fonctionnement prévus

Les coûts-machine présentés ci-dessous sont basés sur une variation réaliste des coûts auxquels on peut s'attendre, compte tenu de l'incertitude qui entre dans certaines estimations. Le coût total ($/tonne verte) peut être calculé d'après l'équation suivante:

$$\$/\text{tonne verte} = \left[\frac{A-R}{D}\left(1 + \frac{i(a+1)}{2}\right) + \frac{iR}{n} + E + S\right]\frac{100}{U} + C\Big]\frac{1}{P}$$

où on pose les hypothèses suivantes:

A = prix d'achat, $	400 000
R = valeur résiduelle (10% du prix d'achat)	40 000
D = durée de vie économique de la machine, HMPv	16 000
i = intérêt et assurance, % (taux préférentiel + 2% + 2% assurance)	15
a = période d'amortissement, années	5
n = HMPv/année, (6 mois de fonctionnement, 2 poste de travail par jour)	2 000
E = coût d'entretien, $/HMPv (100% des frais fixes, A/D)	25,00
S = salaire de l'opérateur, $/HMPv (12,00 $/h + 25% avantages sociaux)	15,00
U = taux d'utilisation*, %	70
C = carburant et lubrifiants, $/HMP (50 L/h + 10% lubrifiants) x 0,53/L	29,15
P = productivité, tonnes vertes/HMP	26,0

* On suppose un taux d'utilisation de 70% pour tenir compte du temps de déplacement de la machine entre les piles.

L'emploi des valeurs ci-dessus dans l'équation donne les résultats suivants:

coût total de la machine, $/HMP	137,29 $
coût de production, $/tonne verte	5,28 $

À partir des hypothèses ci-dessus, on obtient un coût de fonctionnement total pour le LRP travaillant en bordure de route de 137,29 $/HMP ou 5,28 $/tonne verte (dans la remorque). À première vue, le coût par tonne semble acceptable. Toutefois les coûts n'apparaissent plus aussi raisonnables quand on détermine les dépenses (3 696 $/ha) qu'implique la récupération d'un hectare de superficie forestière productive (la quantité moyenne des résidus égale 700 tonnes vertes/ha). De toute évidence, l'utilisation du LRP pour remettre en valeur ces superficies doit se faire conjointement avec l'utilisation du bois à des fins énergétiques.

CONCLUSIONS

Les résultats des essais du LRP modifié montrent un taux potentiel de production de 26 tonnes vertes/HMP, soit 4 tonnes de plus que le premier prototype. Cependant la faible productivité de la chargeuse limitait le taux réel de fragmentation de la machine à 12 tonnes vertes/HMP. Le manque d'expérience de l'opérateur, la longueur des temps du cycle, et les petites charges du grappin étaient tous des éléments qui contribuaient à la faible productivité de la chargeuse. Il est évident qu'il faut augmenter la productivité de la chargeuse de façon à ce qu'elle corresponde à la capacité de fragmentation de la machine. En augmentant la charge moyenne par grappin des 243 kg mesurés à la capacité nominale de 500 kg, on augmenterait la productivité de la chargeuse à 26 tonnes/HMP. L'installation d'une goulotte d'alimentation en forme d'entonnoir, facilitant le positionnement et l'entrée des résidus dans le tambour de cisaillement améliorerait la productivité de 4 autres tonnes/HMP.

La modification dans l'ordre d'attaque des couteaux s'est révélée efficace, puisqu'il ne s'est produit aucun blocage ou manque de puissance durant la fragmentation. Le broyeur à marteaux et le souffleur fonctionnaient bien, projetant les résidus fragmentés jusqu'à 26 m du tuyau d'évacuation. Si toutefois l'utilisation de ces résidus (à des fins énergétiques) ne répondait pas aux besoins des utilisateurs de fibre, le tuyau d'évacuation devrait subir certaines modifications pour disperser les débris sur l'aire de coupe. Il faudrait également un mécanisme d'oscillation du tuyau pour souffler les résidus sur une étendue plus vaste. Une plus grande dispersion est nécessaire pour faciliter les opérations ultérieures de scarifiage et de plantation de ces superficies forestières productives. De plus, l'effet de la présence de ces résidus sur la mortalité ou la croissance des semis mérite d'être étudié sérieusement.

Le LRP a permis d'accroître la densité en vrac des résidus d'arbres entiers de 200 kg/m^3 à 370 kg/m^3, favorisant d'autant les opérations ultérieures de transport. Toutefois la haute teneur en humidité (de 100% à 275%, base anhydre) de ces résidus demandera sans doute une forme de séchage avant le brûlage.

Les piles de résidus étaient disposées à une distance variant de 16 à 24 m du bord de la route; il fallait donc augmenter la portée de la flèche du LRP, actuellement à 18,3 m, pour ramasser tous les résidus échantillonnés. Cela ne serait pas nécessaire aux endroits permettant à la machine de fonctionner hors-route. On pourrait également modifier l'équipement et/ou les techniques d'ébranchage de façon à déposer les résidus plus près de la route, mais ce serait au prix d'une réduction dans la productivité de l'ébrancheuse.

L'étude a montré qu'on pouvait s'attendre à un coût de fonctionnement de 5,28 $/tonne verte (dans la remorque), compte tenu du potentiel du LRP en bordure de route. Pour une seule tonne, le coût semble être acceptable. Mais si on considère le fait qu'un hectare porte en moyenne 700 tonnes vertes de résidus, cela représente un coût de 3 500 $ pour remettre en valeur un hectare de terrain forestier productif. Il est donc peu probable que des machines comme le LRP soient utilisées pour la récupération de superficies forestières

productives, à moins que le coût par hectare puisse être compensé par la valeur énergétique des résidus fragmentés.

Par ailleurs, le rendement économique de l'utilisation de la biomasse forestière pour la production d'énergie ne semble guère prometteur dans le contexte actuel de baisse des prix du pétrole. Les efforts devraient donc à l'avenir s'orienter davantage vers l'amélioration de l'équipement et/ou des techniques actuels (c'est-à-dire épandage au râteau, brûlage), permettant de traiter les piles de résidus en bordure de route.

BIBLIOGRAPHIE

1. DuSault, A. 1985. Développement et mise à l'essai des prototypes RECUFOR et LRP en vue de la récupération de la biomasse forestière. Rapport ENFOR P-210. Inst. can. de rech. en génie forestier, rapport RS-36, 37 p.

2. Canuel, B. 1984. Mesure des pertes de superficies forestières productives suite à la récolte de la matière ligneuse au Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, 22 p.

3. Silversides, C.R., Moodie, R.L. 1985. Transport d'arbres entiers sur les routes publiques dans l'est du Canada: revue de la technologie de pointe. Rapport ENFOR P-312. Inst. can. de rech. en génie forestier, rapport RS-35, 71 p.

ANNEXE A

TABLE DE CONVERSION

1 cm (centimètre)	0,394 pouce
1 ha (hectare)	2,471 acres
1 m (mètre)	3,281 pieds
1 m^3 (mètre cube)	35,315 pieds cubes
1 kg (kilogramme)	2,205 livres
1 kW (kilowatt)	1,34 hp
1 km (kilomètre)	0,621 mille

$$\frac{9}{5}°C + 32 = °F$$